

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Dario Forgač**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar, dipl. ing.

Student:

Dario Forgač

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Draženu Lončaru i asistentu Anti Marušiću na uloženom trudu i pomoći prilikom pisanja ovog rada.

Dario Forgač



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodogradarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dario Forgač** Mat. br.: 0035195646

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dinamika otočnog pogona ORC postrojenja snage 1 MW**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Off-grid operation dynamics of 1 MW ORC plant**

Opis zadatka:

Otočni pogon postrojenja na biomasu koja opskrbljuju industrijske potrošače toplinskom i električnom energijom jedan je od složenijih izazova kojim se suočavaju projektanti i isporučitelji opreme. Slijedom razmjerno nepovoljnog omjera električne i toplinske snage ORC postrojenja potrebno je istražiti prihvatljiva tehnička rješenja koja će omogućiti pohranu viškova toplinske energije u uvjetima povećane potražnje za električnom energijom i naknadno korištenje pohranjene toplinske energije u proizvodnji električne.

U svrhu procjene utjecaja promjenjivih režima otočnog pogona u okviru rada potrebno je:

1. Izvesti pojednostavljeni matematički model dinamike procesa za ORC postrojenje s termouljnim kotlom i izgaranjem biomase na rešetki snage 1 MW;
2. Simulirati odzive postrojenja u uvjetima otočnog pogona i promjenjivih potreba za električnom i toplinskom energijom tvrtke za proizvodnju drvnih peleta;
3. Analizirati moguća tehnička rješenja za pohranu viškova toplinske energije.

U tekstu završnog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.  
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.  
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.  
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.  
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## Sadržaj

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK .....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
1.1. Kogeneracijsko postrojenje na šumsku biomasu .....	1
2. PRINCIP RADA ORC POSTROJENJA.....	3
2.1. Radni fluidi .....	5
3. KONFIGURACIJA ORC POSTROJENJA .....	7
3.1. ORC modul .....	7
3.2. Termouljni kotao.....	8
4. PRORAČUN KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA .....	9
4.1. Izbor radnog fluida i pojednostavljena shema ORC procesa .....	10
4.2. Turbina .....	12
4.3. Pumpa.....	13
4.4. Regenerator .....	13
4.5. Termo ulje .....	14
4.6. Isparivač .....	14
5. IZGARANJE BIOMASE NA REŠETKI .....	17
6. TERMODINAMIČKI PRORAČUN IZGARANJA .....	20
7. MODELIRANJE TERMOULJNOG KOTLA .....	24
7.1. Pojednostavljeni matematički model termouljnog kotla.....	32
8. MATEMATIČKI MODEL POVRATNE I DOBAVNE CIJEVI .....	37
9. TOPLINSKI SPREMNIK .....	41
9.1. Matematički model toplinskog spremnika .....	42
10. REZULTATI SIMULACIJE .....	50
10.1. Stacionarno stanje sustava.....	50
10.2. Rezultati simulacije za slučaj bez toplinskog spremnika .....	54
10.3. Rezultati simulacije sa toplinskim spremnikom.....	57
10.3.1 Spremnik ispred termouljnog kotla .....	58
10.3.2 Spremnik iza termouljnog kotla .....	60
11. ZAKLJUČAK.....	61
LITERATURA.....	62
PRILOZI .....	63

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Kogeneracijsko postrojenje na šumsku biomasu u Udbini [2].....	1
Slika 2.	Shema procesa kogeneracijskog postrojenja i pogona za proizvodnju peleta [2] ...	2
Slika 3.	T-s dijagram za vodu i druge radne fluide [3] .....	3
Slika 4.	ORC kogeneracijsko postrojenje na biomasu [5] .....	4
Slika 5.	Usporedba radnih fluida iz različitih grupa [6] .....	5
Slika 6.	Turboden 10 CHP-Split [8] .....	7
Slika 7.	Kotlovsko postrojenje [10] .....	8
Slika 8.	Pojednostavljena shema sustava [4] .....	9
Slika 9.	Shema ORC procesa.....	10
Slika 10.	Prikaz ORC procesa sa regeneratom.....	11
Slika 11.	Izgaranje biomase na rešetki [12].....	17
Slika 12.	Termouljni kotao [16] .....	24
Slika 13.	a) Prikaz presjeka namotaja b) Strujanje dimnih plinova u tri prolaza [15].....	25
Slika 14.	Ovisnost koeficijenta prijelaza topline dimnih plinova o razmaku između namotaja [15].....	26
Slika 15.	Temperature struja kod protusmjernog rekuperatora .....	28
Slika 16.	Cijev podijeljena na 10 segmenata .....	32
Slika 17.	Segment cijevi .....	33
Slika 18.	Povratna i dobavna cijev podijeljena na segmente.....	37
Slika 19.	Segment povratne i dobavne cijevi .....	38
Slika 20.	Toplinski spremnik [4] .....	41
Slika 21.	Presjek toplinskog spremnika podijeljenog na 5 segmenata u aksijalnom smjeru ..	42
Slika 22.	Segment toplinskog spremnika, stijenke i termo ulja.....	43
Slika 23.	Stacionarno stanje prvih pet minuta simulacije.....	51
Slika 24.	Praćenje dinamike nakon pete minute .....	51
Slika 25.	Odziv temperatura po segmentima za dimne plinove unutar termouljnog kotla ..	52
Slika 26.	Odziv temperatura po segmentima za termo ulje unutar termouljnog kotla .....	52
Slika 27.	Odziv temperatura po segmentima za dobavnu i povratnu cijev .....	53
Slika 28.	Odziv karakterističnih temperatura za slučaj s obilaznim vodom.....	53
Slika 29.	Linearni porast dobave goriva .....	54
Slika 30.	Vremenski profil temperatura za prvi slučaj slučaj .....	55
Slika 31.	Vremenski profil temperatura za drugi slučaj .....	55
Slika 32.	Promjena električne snage za prvi slučaj bez toplinskog spremnika .....	56
Slika 33.	Promjena električne snage za drugi slučaj bez toplinskog spremnika .....	57
Slika 34.	Toplinski spremnik od betona smješten umjesto povratne cijevi.....	58
Slika 35.	Toplinski spremnik od lijevanog željeza smješten umjesto povratne cijevi .....	59
Slika 36.	Toplinski spremnik od betona smješten umjesto dobavne cijevi .....	60
Slika 37.	Toplinski spremnik od lijevanog željeza smješten umjesto dobavne cijevi.....	60

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Podaci koji će se koristiti u proračunu .....	8
Tablica 2. Radni parametri za MDM .....	10
Tablica 3. Vrijednosti za turbinu .....	12
Tablica 4. Vrijednosti za pumpu .....	13
Tablica 5. Vrijednosti za regenerator .....	13
Tablica 6. Promjena opterećenja ORC-a variranjem ulazne temperature ( $m_{tu}=\text{konst.}$ )[4].....	14
Tablica 7. Svojstva termo ulja.....	15
Tablica 8. Izmijenjeni toplinski tokovi u procesu .....	15
Tablica 9. Podaci za simulaciju ORC-a .....	16
Tablica 10. Kemijski sastav drvene sječke .....	20
Tablica 11. Minimalna potrebna masa kisika i zraka.....	21
Tablica 12. Mase pojedinih sudionika u dimnim plinovima.....	21
Tablica 13. Ogrjevna vrijednost goriva i masa dimnih plinova .....	21
Tablica 14. Količine pojedinih sudionika u dimnim plinovima.....	22
Tablica 15. Maseni i molni udeli.....	22
Tablica 16. Rezultati iterativnog proračuna .....	23
Tablica 17. Plinske konstante.....	27
Tablica 18. Vrijednosti za dimne plinove .....	27
Tablica 19. Potreban maseni protok dimnih plinova.....	29
Tablica 20. Geometrijski podaci i svojstva materijala cijevi .....	30
Tablica 21. Vrijednosti za protusmjerni izmjenjivač topline .....	31
Tablica 22. Podaci za matematički model termouljnog kotla .....	32
Tablica 23. Izračunate vrijednosti za matematički model termouljnog kotla .....	36
Tablica 24. Geometrijski podaci za dobavnu i povratnu cijev [4] .....	37
Tablica 25. Vrijednosti za izmjenu topline u povratnoj i dobavnoj cijevi .....	39
Tablica 26. Izračunate vrijednosti za matematički model povratne i dobavne cijevi .....	40
Tablica 27. Svojstva materijala toplinskog spremnika [4] .....	41
Tablica 28. Vrijednosti za izmjenu topline između stijenke cijevi i termo ulja unutar toplinskog spremnika .....	47
Tablica 29. Podaci za cijev od ugljičnog čelika [4] .....	48
Tablica 30. Izračunate vrijednosti za matematički model toplinskog spremnika .....	49
Tablica 31. Masa toplinskih spremnika za slučaj postavljanja umjesto povratne cijevi.....	59

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$h$	J/kg	Specifična entalpija
$\dot{m}_{rt}$	kg/s	Maseni protok radne tvari
$P_t$	W	Snaga turbine
$T$	K	Termodinamička temperatura
$p_{isp}$	Pa	Tlak isparavanja
$p_{kond}$	Pa	Tlak kondenzacije
$P_p$	W	Snaga pumpe
$\dot{Q}_{reg}$	W	Toplinski tok izmijenjen u regeneratorsu
$\dot{m}_{tu}$	kg/s	Maseni protok termo ulja
$\vartheta_{ul\_ORC}$	°C	Temperatura na ulazu u ORC
$\vartheta_{izl\_ORC}$	°C	Temperatura na izlazu iz ORC-a
$T_{sr\_tu}$	K	Srednja temperatura termo ulja
$T_{ul\_ORC}$	K	Temperatura na ulazu u ORC
$T_{izl\_ORC}$	K	Temperatura na izlazu iz ORC-a
$\rho_{tu}$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća termo ulja
$c_{tu}$	J/(kg K)	Specifični toplinski kapacitet termo ulja
$\dot{Q}_{tu}$	W	Izmijenjeni toplinski tok termo ulja
$\dot{Q}_{isp\_uk}$	W	Ukupni izmijenjeni toplinski tok u isparivaču
$\dot{Q}_{pred}$	W	Toplinski tok potreban za predgrijavanje radne tvari
$\eta_t$	-	Izentropska iskoristivost turbine
$\eta_p$	-	Iskoristivost pumpe
$c,h,o,n,w$	kg/kg	Maseni udio ugljika, vodika, kisik, dušika i vlage u krutom gorivu
$\lambda$	(kg/kg)	Faktor (maseni) prečišćavanja zraka
$o_{min}$	kg/kg	Relativna minimalna masa kisika
$l_{min}$	kg/kg	Relativna minimalna masa zraka
$\Delta h_d$	J/kg	Specifična donja ogrjevna vrijednost goriva
$x_i$	kg/kg	Maseni udio dimnih plinova
$\vartheta_{ad}$	°C	Adijabatska temperatura izgaranja
$m_i$	kg/kg	Relativna masa pojedinog plina
$m_{vdp}$	kg/kg	Relativna masa vlažnih dimnih plinova
$n_i$	mol/kg	Količina pojedinog plina po jedinici mase
$n_{vdp}$	mol/kg	Količina vlažnih dimnih plinova po jedinici mase
$y_i$	-	Molni udio dimnih plinova
$c_p$	J/(kg K)	Specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku



$[c_p]_0^{\vartheta}$	J/(kg K)	Srednji specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku, nad temperaturnim intervalom od 0 do $\vartheta$ °C
$[c_p]_{\vartheta_1}^{\vartheta_2}$	J/(kg K)	Srednji specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku, nad temperaturnim intervalom od $\vartheta_1$ do $\vartheta_2$ °C
$C_{mp}$	J/(kmol K)	Molarni toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku
$[C_{mp}]_{\vartheta_1}^{\vartheta_2}$	J/(kmol K)	Srednji molarni toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku, nad temperaturnim intervalom $\vartheta_1$ i $\vartheta_2$
$M_{dp\_mol}$	kg/kmol	Molarna masa dimnih plinova
$\vartheta_{izl\_dp}$	°C	Izlazna temperatura dimnih plinova
$\delta_{nam}$	m	Razmak između namotaja
$\alpha_{dp}$	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova
$R_{dp}$	J/(kg K)	Plinska konstanta dimnih plinova
$T_{sr\_dp}$	K	Srednja temperatura dimnih plinova
$T_{ad}$	K	Adijabatska temperatura dimnih plinova
$T_{dp\_izl}$	K	Temperatura dimnih plinova na izlazu
$\rho_{dp}$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća dimnih plinova
$\dot{m}_G$	kg/s	Maseni protok goriva
$\dot{Q}_{dp}$	W	Toplinski tok koji predaju dimni plinovi unutar termoljnog kotla
$C_1$	W/K	Toplinski kapacitet slabije struje
$C_2$	W/K	Toplinski kapacitet jače struje
$\Pi_1$	-	Bezdimenzijska temperaturna značajka
$\Pi_2$	-	Bezdimenzijska značajka broja prijenosnih jedinica
$\Pi_3$	-	Bezdimenzijska značajka omjera toplinskih kapaciteta struja
$k$	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prolaza topline
$A_{izmj}$	m <sup>2</sup>	Potrebna površina izmjene topline
$D_u$	m	Unutarnji promjer cijevi
$t$	m	debljina cijevi
$D_v$	m	Vanjski promjer cijevi
$c_{st}$	J/(kg K)	Specifični toplinski kapacitet cijevi
$\rho_{st}$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća cijevi
$A_u$	m <sup>2</sup>	Površina unutarnjeg presjeka cijevi
$A_v$	m <sup>2</sup>	Površina vanjskog presjeka cijevi
$v_{tu}$	m/s	Brzina termo ulja
$\mu_{tu}$	Pa s	Dinamička viskoznost termo ulja
$Re$	-	Reynoldsova značajka
$Pr$	-	Prandtlova značajka
$Nu$	-	Nusseltova značajka
$\alpha_{tu}$	W/(m <sup>2</sup> K)	Koeficijent prijelaza topline na strani termo ulja
$\lambda_{tu}$	W/(m K)	Toplinska provodnost termo ulja

$L_{izmj}$	m	Ukupna duljina izmjenjivača
$M_{dp}$	kg	Masa dimnih plinova
$M_{tu}$	kg	Masa termo ulja
$M_{st}$	kg	Masa stijenke cijevi
$\dot{m}_{dp}$	kg/s	Maseni protok dimnih plinova
$D_{c\_u}$	m	Unutarnji promjer povratne i dobavne cijevi
$t_c$	m	Debljina povratne i dobavne cijevi
$D_{c\_v}$	m	Vanjski promjer dobavne i povratne cijevi
$L_c$	m	Duljina povratne i dobavne cijevi
$M_c$	kg	Masa povratne i dobavne cijevi
$v_{tuc}$	m/s	Brzina termo ulja unutar povratne i dobavne cijevi
$A_{tuc}$	m <sup>2</sup>	Površina izmjene topline unutar povratne i dobavne cijevi
$c_{ts}$	J/(kg K)	Specifični toplinski kapacitet toplinskog spremnika
$\rho_{ts}$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća toplinskog spremnika
$\lambda_{ts}$	W/(m K)	Toplinska provodnost toplinskog spremnika
$\dot{Q}_{ts\_32}$	W	Toplinski tok izmijenjen između drugog i trećeg segmenta toplinskog spremnika u radijalnom smjeru
$\dot{Q}_{ts\_21}$	W	Toplinski tok izmijenjen između prvog i drugog segmenta toplinskog spremnika u radijalnom smjeru
$\dot{Q}_{ts-st}$	W	Toplinski tok izmijenjen između prvog segmenta toplinskog spremnika u radijalnom smjeru i stijenke cijevi
$\dot{Q}_{st-tu}$	W	Toplinski tok izmijenjen između stijenke cijevi i termo ulja unutar cijevi
$M_{ts}$	kg	Masa toplinskog spremnika
$c_{cts}$	J/(kg K)	Specifični toplinski kapacitet cijevi od ugljičnog čelika
$\rho_{cts}$	kg/m <sup>3</sup>	Gustoća cijevi od ugljičnog čelika
$\lambda_{cts}$	W/(m K)	Toplinska provodnost cijevi od ugljičnog čelika
$D_{u\_ts}$	m	Unutarnji promjer cijevi unutar toplinskog spremnika
$t_{cts}$	m	debljina stijenke cijevi od ugljičnog čelika
$D_{v\_ts}$	m	Vanjski promjer cijevi unutar toplinskog spremnika
$A_{u\_ts}$	m <sup>2</sup>	Površina unutarnjeg presjeka cijevi od ugljičnog čelika
$A_{v\_ts}$	m <sup>2</sup>	Površina vanjskog presjeka cijevi od ugljičnog čelika
$A_{ts}$	m <sup>2</sup>	Površina presjeka toplinskog spremnika
$D_{ts}$	m	Promjer toplinskog spremnika
$\delta_{ts}$	m	Debljina materijala toplinskog spremnika

## SAŽETAK

U okviru ovoga rada analizira se uporaba toplinskog spremnika koji će prilikom pogona ORC postrojenja na biomasu u uvjetima otočnog pogona omogućiti pravovremeno usklađivanje za potražnjom električne energije. U prvome dijelu izveden je pojednostavljeni matematički model dinamike procesa za ORC postrojenje s termouljnim kotlom i izgaranjem biomase na rešetki. Također, proveden je termodinamički proračun izgaranja drvene sječke poznatog kemijskog sastava. U nastavku je opisan toplinski spremnik koji je sastavljen od velikog broja cijevi koje su obložene različitim materijalima poput lijevanog željeza ili betona različitih debljina u svrhu pohrane toplinske energije u obliku osjetne topline. Na samom kraju prikazana je usporedba rezultata simulacije za slučaj sa ili bez toplinskog spremnika, te su prikazane prednosti i nedostaci toplinskog spremnika s obzirom na njegovo pozicioniranje u odnosu na termouljni kotao.

Ključne riječi: biomasa , ORC, otočni pogon, toplinski spremnik, dinamička analiza

## **SUMMARY**

In the context of this paper analyzed is use of thermal energy storage that will provide real time matching of electric power demand of biomass ORC plant running in an off-grid area. In the first part, simplified mathematical model of process dynamics for ORC plant with thermal oil boiler and biomass combustion on grate is shown. Also, a termodinamical calculation of combustion of wood chips of known chemical composition is carried out. In extension, described is a thermal energy storage made up of a large number of pipes coated with different materials such as cast iron or concrete with variable thickness with purpose of storing thermal energy in a form of sensible heat. At the end the comparison of the results of simulation is given for the case with or without thermal energy storage, and his advantages and disandvantages in regards to its positioning in correspondence of thermal oil boiler.

Key words: biomass, ORC, off-grid systems, thermal storage, dynamic analysis

## 1. UVOD

Postrojenje s organskim Rankineovim ciklusom za elektrane na šumsku biomasu je sve češće rješenje i danas ih se u svijetu u komercijalne svrhe koristi više od 100 (npr. u Njemačkoj, Austriji, Italiji). Načelo njihovog rada je gotovo jednako kao kod primjene parnoturbinskog postrojenja, osim što se kao radni medij umjesto vodene pare koristi neki organski fluid koji se zagrijava termičkim uljem koje se pak zagrijava u izmjenjivaču topline kotla na biomasu. Električna snaga takvih postrojenja uobičajeno iznosi 200 – 3000 kW, a stupnjevi djelovanja 10 – 25%. U osnovne prednosti takvih postrojenja ubrajaju se razmjerno niže temperaturne razine pri pretvorbi energije (250 – 300 °C), razmjerno veliki stupnjevi iskoristivosti goriva pri manjim opterećenjima (što je osobito prikladno kada treba točno odgovarati na promjene u potražnji za električnom energijom) i mogućnost potpune automatizacije rada. Uz to, organski fluid koji se koristi kao radni medij, za razliku od vodene pare, ne uzrokuje eroziju ili koroziju ventila, cijevi, lopatica turbine i sl. pa takva postrojenja imaju dulji vijek trajanja. Ipak glavni nedostaci su visoki troškovi ulaganja (za manja postrojenja viši od 4000 EUR/kW) i primjena radnog medija koji je zapaljiv na sobnoj temperaturi [1].

### 1.1. Kogeneracijsko postrojenje na šumsku biomasu

Analizirano je postrojenje slično instaliranome u Udbini i opisano u [1].

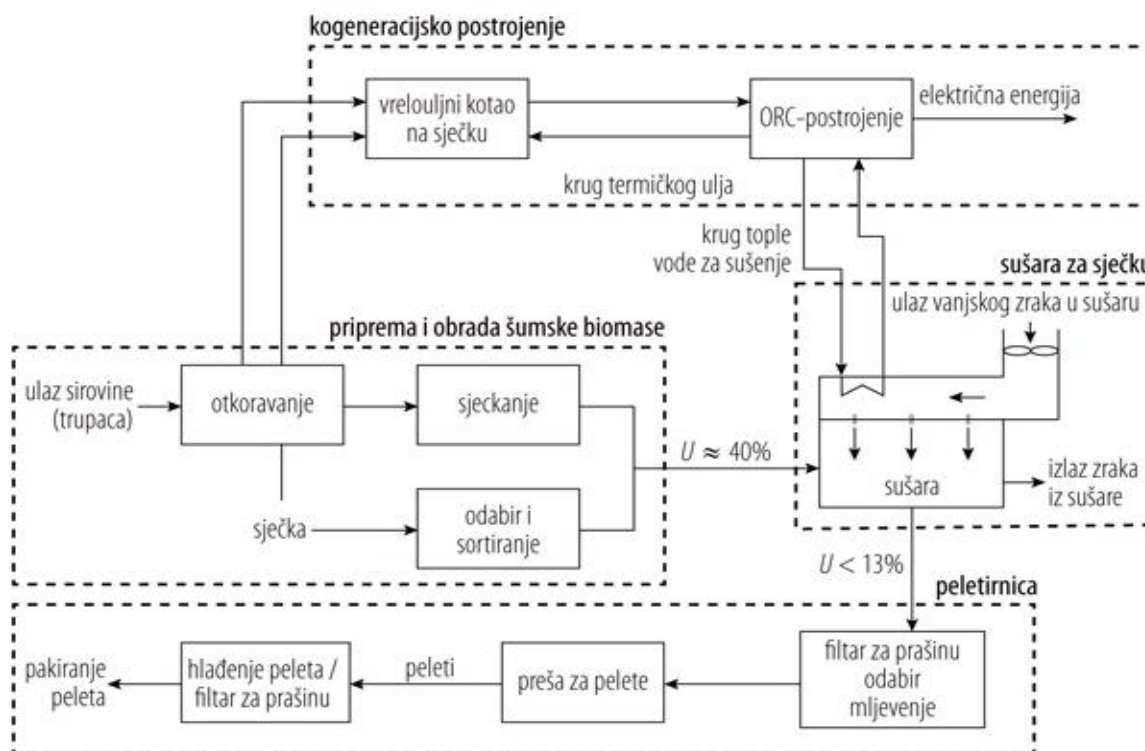


**Slika 1. Kogeneracijsko postrojenje na šumsku biomasu u Udbini [2]**

Proizvodnja peleta te električne i toplinske energije u organskom Rankienovom ciklusu povezani su na jedinstveni način. Kora drva, koja se ne može koristiti u proizvodnji peleta zbog zahtjeva za višom kvalitetom i određenih standarda, koristi se kao gorivo u kotlu u kojem se zagrijava termičko ulje za pogon ORC postrojenja, u kojem se proizvodi više električne energije nego što je potrebno za peleternicu pa se višak isporučuje u javnu elektroenergetsku mrežu. Uz to, viškom topline iz ORC postrojenja se u sušari suši sječka za proizvodnju peleta [1].

Kogeneracijsko postrojenje [1] se može podijeliti u nekoliko osnovnih cjelina:

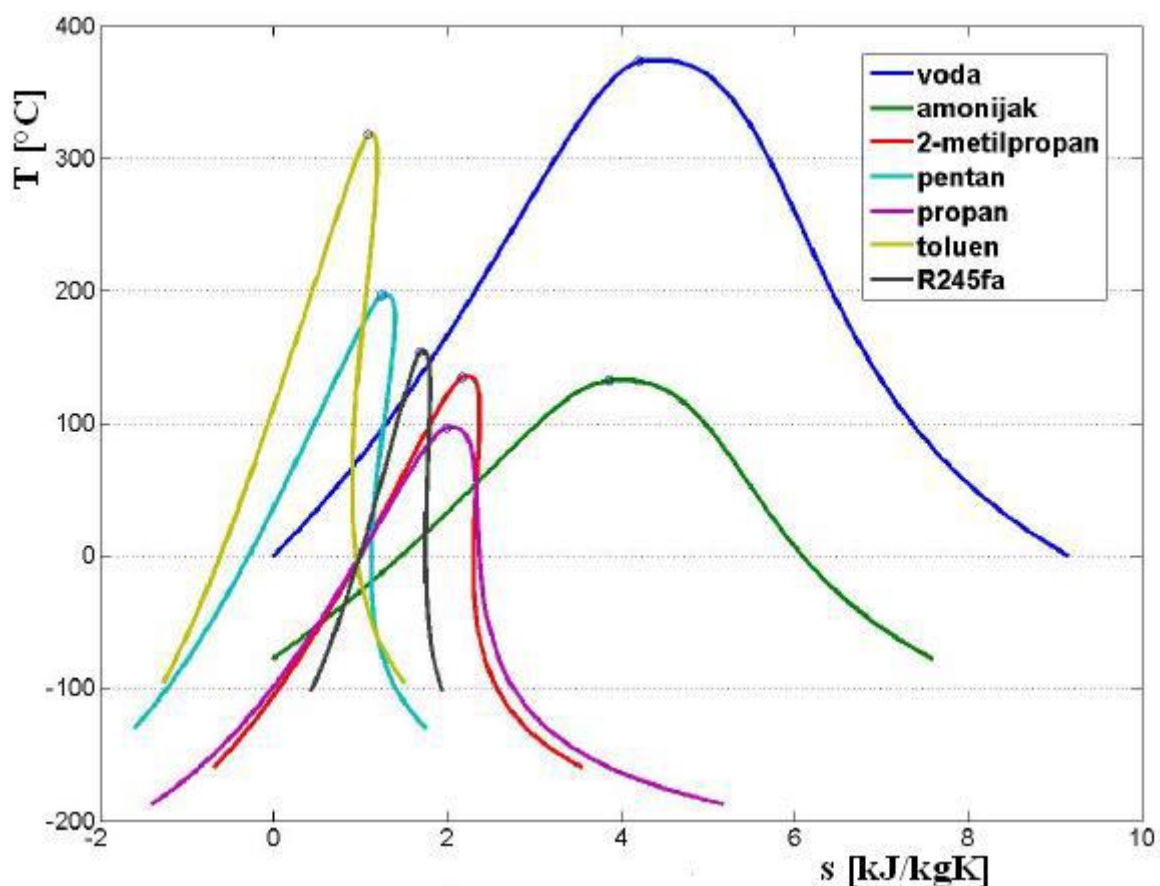
- priprema i obrada šumske ili drvne biomase;
- kogeneracijsko postrojenje (u užem smislu);
- sušara za sječku;
- peleternica.



Slika 2. Shema procesa kogeneracijskog postrojenja i pogona za proizvodnju peleta [2]

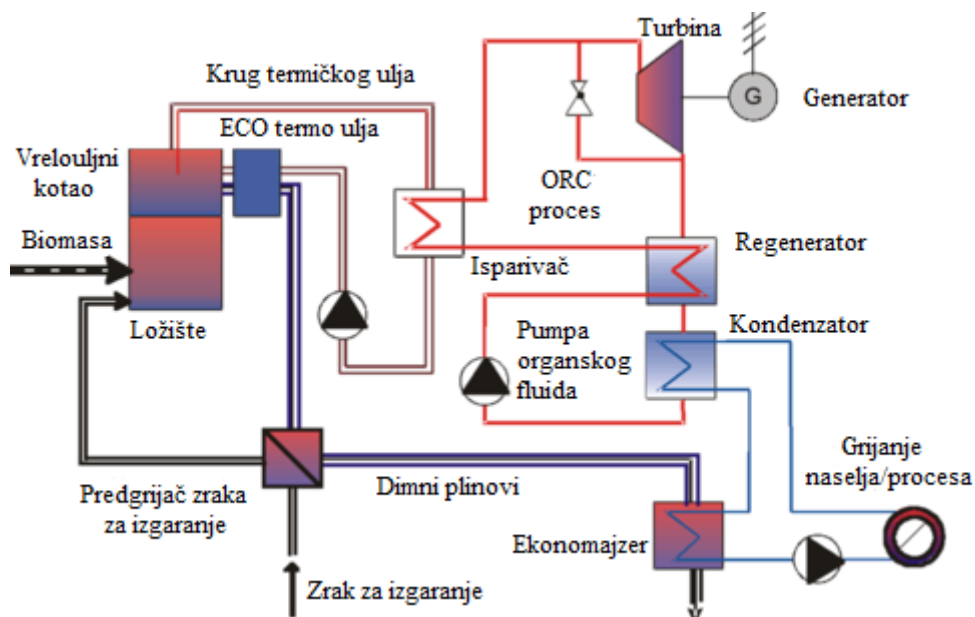
## 2. PRINCIP RADA ORC POSTROJENJA

ORC proces ima isti princip rada i glavne komponente (isparivač, turbinu, kondenzator i pumpu) kao i klasičan Rankineov ciklus. U isto vrijeme postoje i neke velike razlike između ova dva ciklusa. Razlike se uglavnom odnose na korišteni radni fluid u ciklusu, termodinamičke osobine radnog fluida i temperaturu izvora topline. Glavna razlika između dva ciklusa je radni fluid koji se koristi. U Rankineovom ciklusu koristi se samo voda, dok postoje stotine različitih radnih fluida koji se mogu koristiti u ORC ciklusu. Ciklus vodene pare je pogodan za temperature na ulazu u turbinu iznad 350 °C. Većina organskih fluida ima nižu točku vrenja od vode, što ih čini pogodnim za korištenje toplinskog potencijala s temperaturama ispod 350 °C. Ovo pokazuje da organski fluidi trebaju nižu temperaturu izvora topline od vode kako bi prešli u parnu fazu, te kao takvi mogu koristiti niskoentalpijske izvore topline [3].



Slika 3. T-s dijagram za vodu i druge radne fluide [3]

Tipičan kogeneracijski ORC proces baziran na biomasi prikazuje Slika 4.



**Slika 4. ORC kogeneracijsko postrojenje na biomasi [5]**

Kao što se vidi sa Slike 4 kod kogeneracijskih niskoentalpijskih ORC postrojenja (u ovom slučaju ulazni energent je biomasa) koristi se među krug termičkog ulja koje služi kao medij posrednik između topline dobivene izgaranjem biomase i radnog fluida. Naime, kod visokih temperatura, voda i para zahtijevaju i odgovarajući visoki radni tlak, koji je kod sustava s termičkim uljem do temperatura 300 °C minimalan. U industrijskoj i energetske primjeni potreban je visok temperaturni nivo, a postizanje tog režima s parom i vodom tehnički je zahtjevno. Postoji još nekoliko prednosti sustava s termičkim uljem u odnosu na vodeno-parne sustave [3].

S druge strane ovakva izvedba dovodi do [3]:

1. Više cijene postrojenja zbog nužnosti ugradnje izmjenjivača topline (biomasa – termičko ulje, termičko ulje – radni fluid), cirkulacijskih pumpi i cjevovoda s armaturom i mjernom opremom;
2. Složenije izvedbe.

Na temelju navedenog, princip rada kogeneracijskog ORC procesa bazira se na nekoliko sljedećih koraka [3]:

1. Toplinski izvor (biomasa) zagrijava termičko ulje, od 250 °C do 300 °C u zatvorenom radnom krugu. Zagrijano termičko ulje usmjerava se ka isparivaču, gdje se toplina

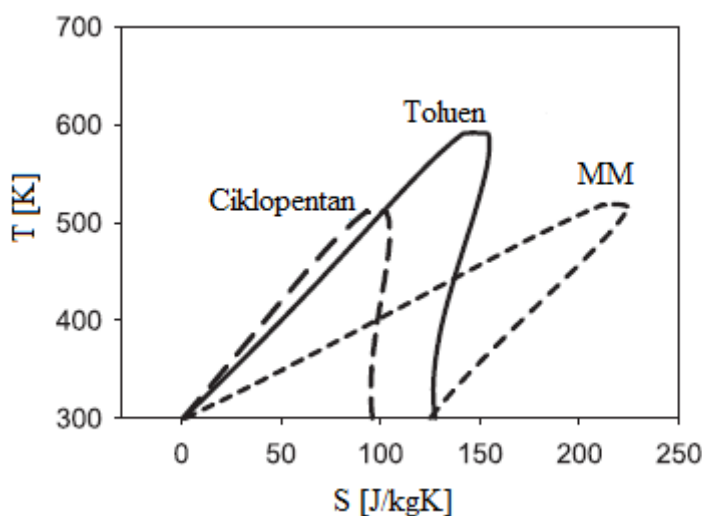


predaje radnom mediju (organski fluid) te on isparava, uz najčešće njegovo prethodno predgrijavanje u regeneratoru;

2. Organska para ekspandira u turbini, gdje se kinetička energija pare pretvara u mehaničku, a mehanička se u generatoru pretvara u električnu energiju. Veza između turbine i generatora je direktna što je moguće zbog relativno malih brzina vrtnje turbine, te su na taj način smanjeni mehanički gubici;
3. Ekspandirana para organskog fluida hladi se u kondenzatoru, gdje se rashladna voda (ili zrak) zagrijava na temperaturu od 80 do 90 °C i može se koristiti za grijanje naselja i druge namjene;
4. Ohlađeno termičko ulje se pumpom vraća u kotao, a kondenzirani organski fluid drugom pumpom se vraća nazad u regenerator, gdje se dogrijava i odlazi u isparivač i ORC proces se ponavlja.

## 2.1. Radni fluidi

Glavni problem kod projektiranja ORC procesa je odabir prikladnog radnog fluida koji prije svega mora biti stabilan, siguran, bez štetnog utjecaja na okoliš i da ima dobra termodinamička svojstva. ORC postrojenja koja rade u visokotemperaturnom režimu rada, gdje su maksimalne temperature radnog fluida u procesu između 180 °C i 300 °C, većinom koriste fluide iz grupe alkana (n-Butan, n-Pentan, Ciklopentan), aromatskih ugljikovodika (Toluen, Etilbenzen, Butilbenzen, m-Xylene, o-Xylene, p-Xylene) i linearnih siloksana (MM, MDM, MD2M, MD3M) [6].



Slika 5. Usporedba radnih fluida iz različitih grupa [6]

Kako će se u okviru ovoga rada koristiti silikonska ulja o čijem odabiru će se više pričati u nastavku, sa Slike 5 je vidljivo da se radi o suhom radnom fluidu (krivulja zasićenja pare s pozitivnim nagibom). S aspekta zaštite opreme (turbina i kondenzatora) suhi fluidi su najpogodniji jer napuštaju turbinu kao pregrijana para i eliminiraju rizik od nastanka korozije. Međutim, preveliki nagib krivulje zasićenja pare suhih radnih fluida dovodi do toga da para napušta turbinu sa značajnim pregrijavanjem, što može biti izgubljeno u kondenzatoru. U tom slučaju regenerator minimizira tu pojavu sa predgrijavanjem radnog fluida prije ulaska u isparivač. Regenerator predstavlja dodatnu složenost i veće investicijske troškove ORC postrojenja. Nadalje, gustoća organskog fluida igra ključnu ulogu pri dimenzioniranju komponenti ciklusa, koje su ovisne o volumnom protoku. Veća gustoća znači manji specifični volumen, niži volumni protok te manje dimenzije komponenata. Silikonska ulja su zapaljiva, ali imaju nisku toksičnost i mali utjecaj na okoliš. Organske fluide karakterizira niska temperatura samozapaljenja, curenjem fluida na spojnim mjestima cjevovoda i armature te kontakt sa zrakom uzrokovao bi zapaljenje fluida. Iz tog razloga je nužno da temperatura samozapaljivosti radnog fluida bude veća od maksimalne temperature izvora topline [3].

Uobičajen postupak (metodologija) za izbor radnog fluida je [3]:

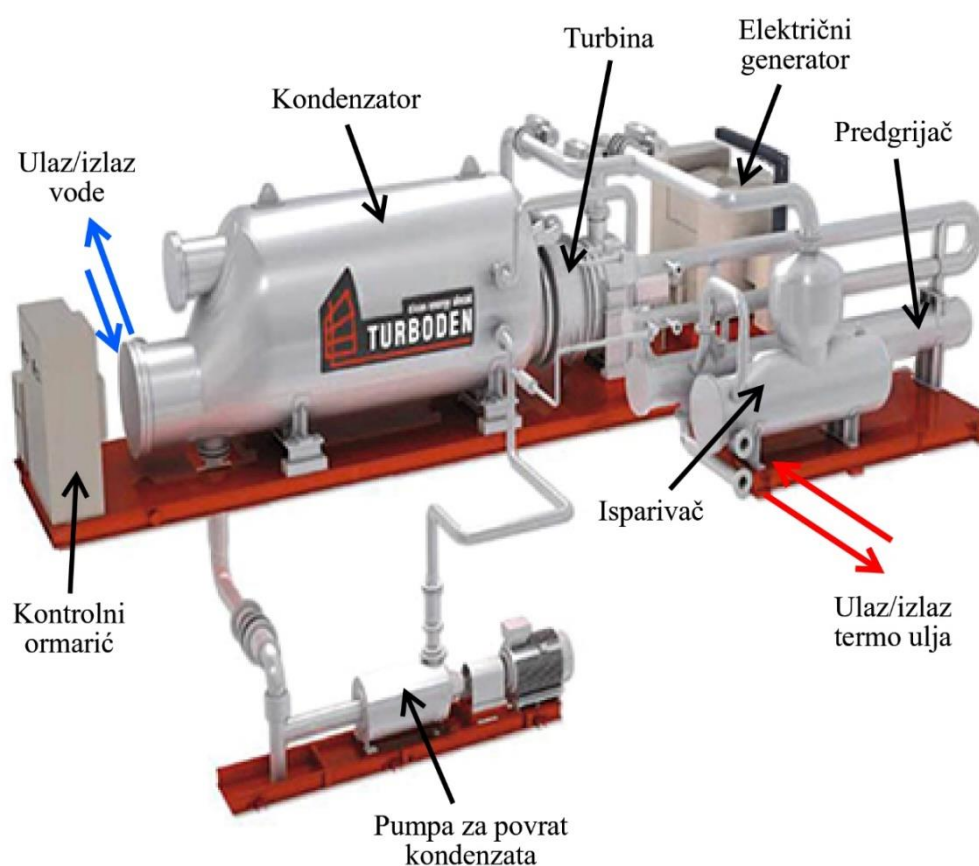
1. Pregled literature o postojećim organskim fluidima;
2. Prvi izbor uzimajući u obzir radnu temperaturu izvora topline i kondenzatora;
3. Drugi izbor sa naglaskom na sigurnost i okoliš (Monrealski protokol);
4. Usporedba termodinamičkih svojstava i određivanje učinkovitosti ciklusa;
5. Provjera dostupnosti turbina u smislu razumnog radnog područja.

### 3. KONFIGURACIJA ORC POSTROJENJA

U nastavku će se dati prikaz pojedinih komponenti kogeneracijskog postrojenja opisanog u [1] prema kojima će se temeljiti veći dio proračuna u nastavku.

#### 3.1. ORC modul

Prva komponenta kogeneracijskog postrojenja je turbinsko ORC-postrojenje Turboden 10 CHP-Split [7].



Slika 6. Turboden 10 CHP-Split [8]

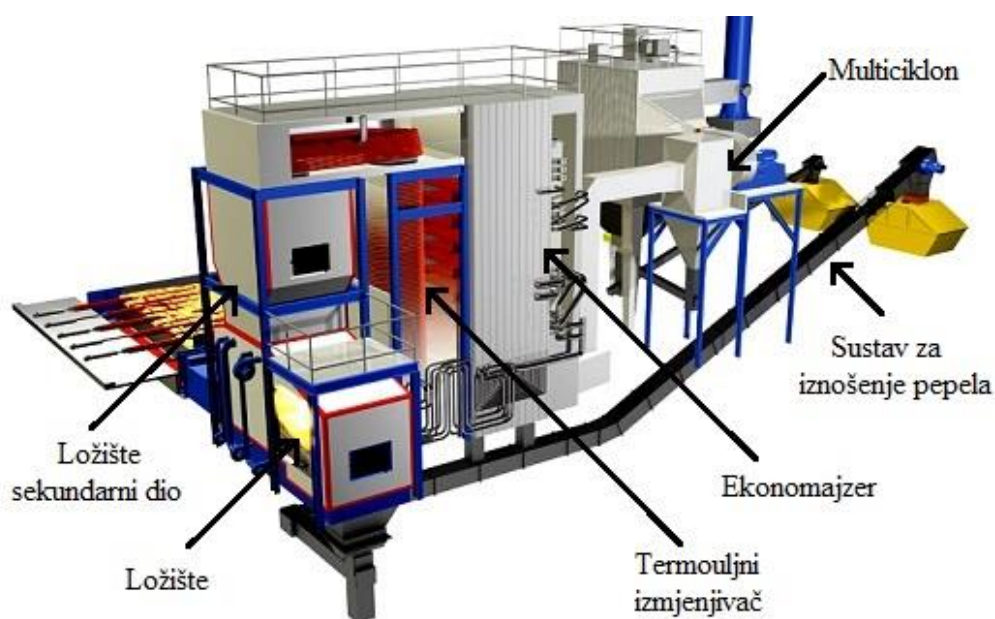
Turboden je razvio različite modele koji koriste silikonsko ulje kao radni fluid. Sakupljene informacije su bazirane na operativnim podacima sakupljenim iz Turbodenovih postrojenja koji se koriste u više od 140 takvih postrojenja unutar Europe, gdje većina koristi biomasu kao gorivo pomoću kojeg se zagrijava termoulje [9].

Tablica 1. Podaci koji će se koristiti u proračunu

ULAZ – termo ulje		
Nazivna temperatura	na izlazu iz kotla (ulazu u isparivač)	300 °C
	na ulazu iz kotla (izlazu iz isparivača)	240 °C
Toplinski učin termouljnog kotla		5050 kW
IZLAZ – TOPLA VODA		
Temperatura tople vode za sušenje sječke	na ulazu u kondenzator (izlazu iz sušare)	60 °C
	na izlazu iz kondenzatora (ulazu u sušaru)	80 °C
Toplinski učin koji je na raspolaganju potrošačima toplinske energije		4095 kW
PERFORMANSE		
Električna snaga na pragu električnog generatora		1000 kW
Ukupan stupanj iskoristivosti ORC postrojenja		19.8 %

### 3.2. Termouljni kotao

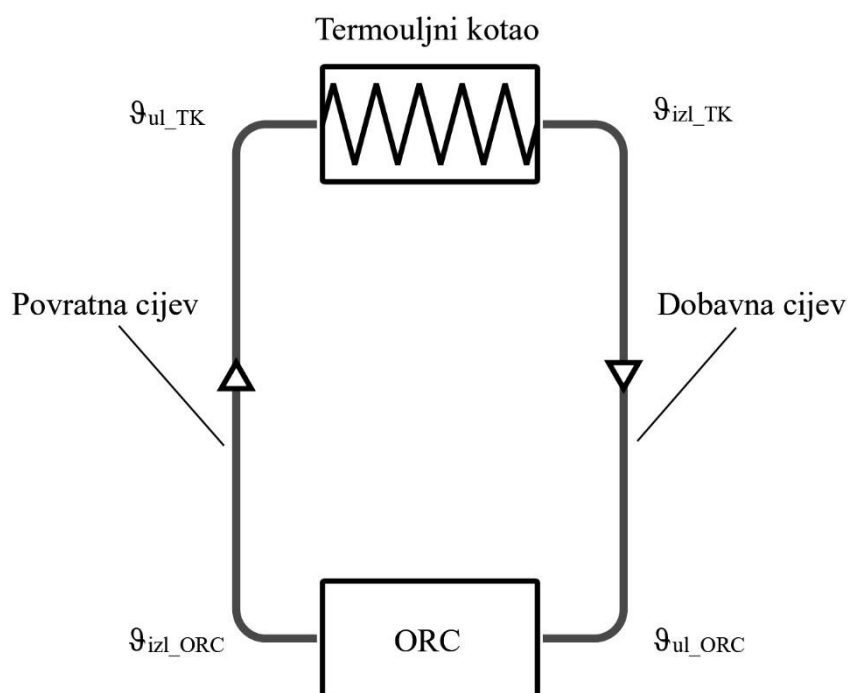
Druga komponenta je kotlovsko postrojenje System K52 proizvođača Kolbach čiji je središnji dio termouljni kotao Unicomfort K12-5140HTK Split. Radi se o kotlu u stojećoj izvedbi koji je postavljen iza komore ložišta [1].



Slika 7. Kotlovsko postrojenje [10]

#### 4. PRORAČUN KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA

Zbog problematike koja je zadana u okviru ovoga rada prikazat će se pojednostavljena shema postrojenja, kako bi bilo moguće izvesti matematičke modele za pojedine komponente. Odabrati će se samo komponente relevantne za dobivanje zadovoljavajućih odziva tako pojednostavljenog sustava. Određene pretpostavke i aproksimacije nužne su zbog diskretne prirode simulacije.



Slika 8. Pojednostavljena shema sustava [4]

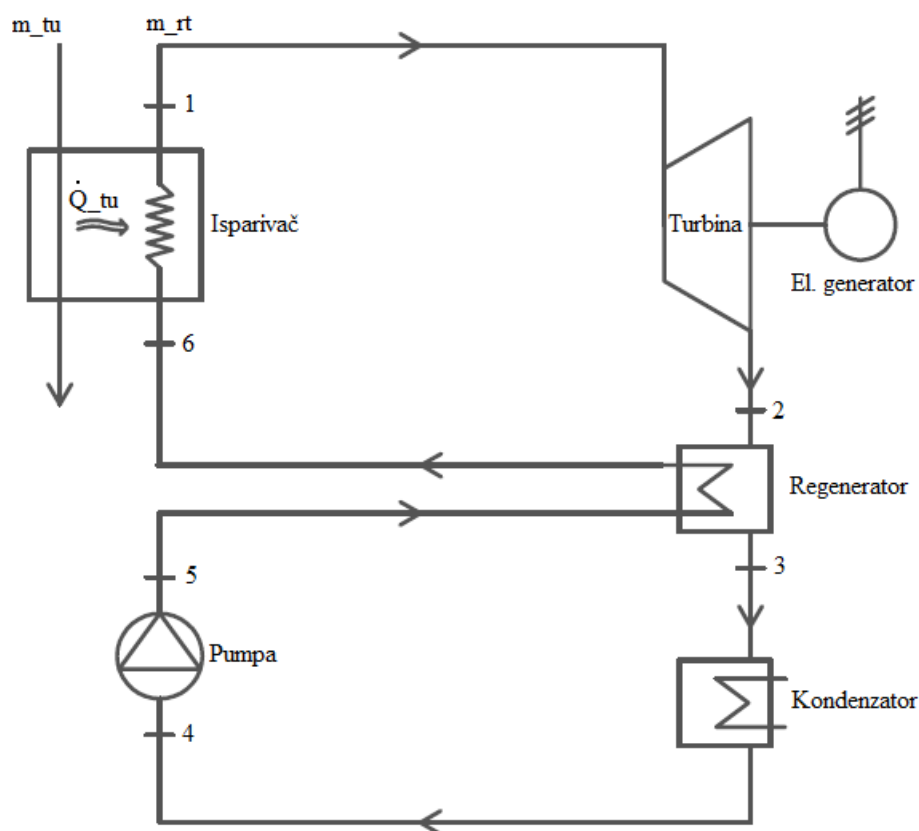
U nastavku, detaljnije će se razraditi i prikazati sljedeće komponente sustava:

- Termouljni kotao;
- Povratna i dobavna cijev;
- ORC;
- Toplinski spremnik koji će zamjenjivati povratnu ili dobavu cijev.

#### 4.1. Izbor radnog fluida i pojednostavljena shema ORC procesa

Odabir prikladnog radnog fluida je najbitniji dio prije početka proračuna. Zadana snaga postrojenja  $1 \text{ MW}_{\text{el}}$  i poznavanje radnih parametra (tlak i temperatura) pod kojima se odvija isparavanje i kondenzacija radne tvari najbitniji su podaci od kojih sve kreće. Budući da je temperaturni režim rashladnog medija 80/60, a temperatura termo ulja će se kretati do  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , radna tvar će imati temperaturu pri kojoj će kondenzirati nešto višu od  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  i temperaturu isparavanja od  $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $280 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Za organski fluid koji ispunjava prethodno spomenute radne parametre odabire se silikonsko ulje MDM, koje je testirano i koje pokazuje zadovoljavajuće rezultate tijekom raznih eksperimenata i istraživanja [6].



Slika 9. Shema ORC procesa

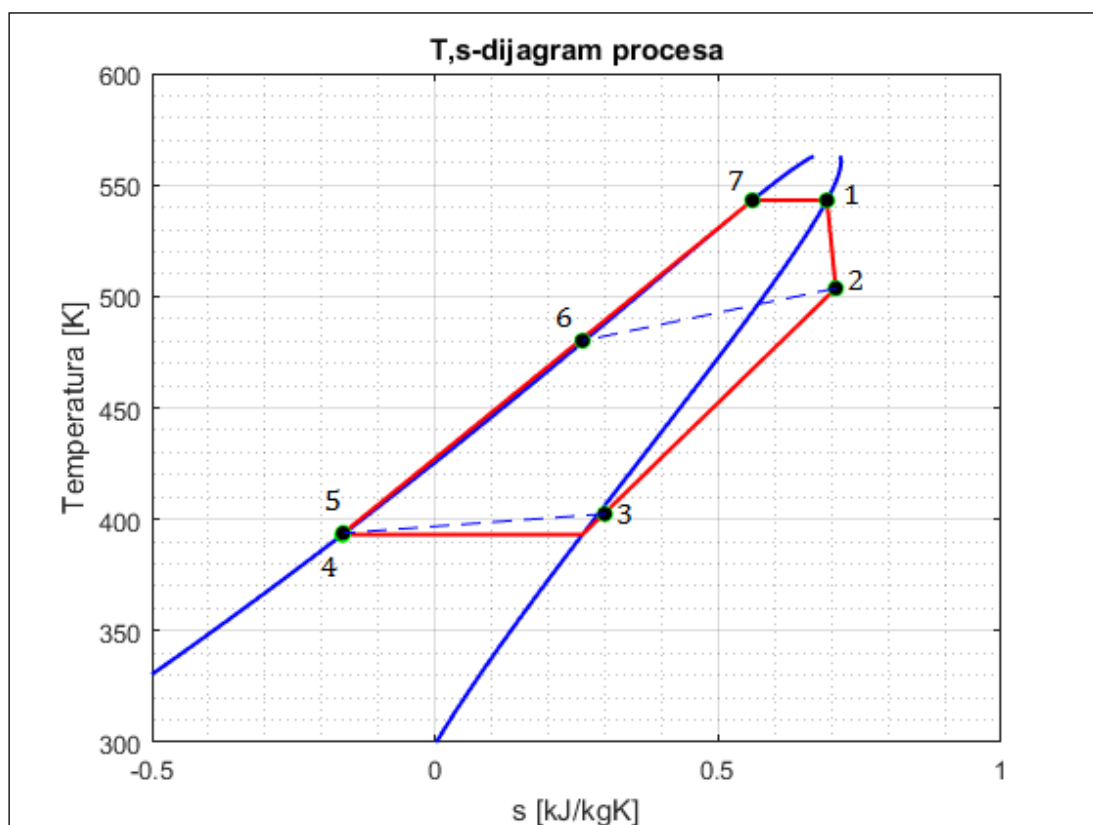
Tablica 2. Radni parametri za MDM

Temperatura isparavanja	$270 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Tlak isparavanja	$10,263 \text{ bar}$
Temperatura kondenzacije	$120 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Tlak kondenzacije	$0,396 \text{ bar}$

Poznavajući temperature i tlakove isparavanja i kondenzacije moguće je pomoću programskog paketa *Matlab*® i aplikacije *CoolProp*® odrediti potrebne vrijednosti entalpije pojedinih točaka i iscrtati T,s-dijagram procesa.

Pretpostavke i pojednostavljenja na temelju kojih je proveden proračun:

- Na izlazu iz isparivača nema pregrijavanja i u turbinu ulazi suhozasićena para (točka 1);
- Na izlazu iz kondenzatora nema pothlađivanja radne tvari te u pumpu ulazi vrela kapljevina (točka 4);
- Točka 3 je dobivena oduzimanjem poznatog toplinskog toka koje termoulje mora predati radnoj tvari da bi isparila (6-1) od ukupnog toplinskog toka (5-1) u slučaju kada ne bi bilo regeneratora, čime se dobije potreban toplinski tok za predgrijavanje (5-6) za koji se pretpostavlja da je osiguran u regeneratoru (2-3).



Slika 10. Prikaz ORC procesa sa regeneratorom

## 4.2. Turbina

Pretpostavljeno je tijekom proračuna da nema gubitaka u generatoru, te da se uzima izentropska iskoristivost turbine  $\eta_t = 0,85$  čime je moguće dobiti vrijednost entalpije realnog procesa na izlazu iz turbine (točka 2) kao što to prikazuje jednadžba (1).

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (1)$$

Zatim je iz poznatih vrijednosti entalpija na ulazu i izlazu iz turbine moguće odrediti maseni protok radne tvari.

$$\dot{m}_{rt} = \frac{P_t}{h_1 - h_2} \quad (2)$$

**Tablica 3. Vrijednosti za turbinu**

Parametar	Vrijednost	Mjerna jedinica
$P_t$	1000	kW
$h_1$	344,33	kJ/kg
$h_{2s}$	291,91	kJ/kg
$h_2$	299,77	kJ/kg
$\dot{m}_{rt}$	22,44	kg/s
$T_1$	543,15	K
$T_2$	503,66	K

S MDM-om kao radnom tvari u ORC procesu potreban maseni protok da se ostvari zadana snaga od 1 MW<sub>el</sub> pri tlaku isparavanja  $p_{isp}=10,263$  bara i tlaku kondenzacije  $p_{kond}=0,396$  bara iznosi  $\dot{m}_{rt} = 22,44$  kg/s.



### 4.3. Pumpa

Iskoristivost pumpe iznosi  $\eta_t = 0,7$  te se na analogan način kao i kod turbine može dobiti vrijednost entalpije realnog procesa (točka 5).

$$\eta_p = \frac{h_{5s} - h_4}{h_5 - h_4} \quad (3)$$

Nakon što se dobije vrijednost entalpije u točki 5, izračunava se potrebna snaga za pogon pumpe pomoću jednadžbe:

$$P_p = \dot{m}_{rt} \cdot (h_5 - h_4) \quad (4)$$

**Tablica 4. Vrijednosti za pumpu**

Parametar	Vrijednost	Mjerna jedinica
h4	-67,168	kJ/kg
h5s	-65,789	kJ/kg
h5	-65,198	kJ/kg
P <sub>p</sub>	44,217	kW
T4	393,15	K
T5	393,87	K

### 4.4. Regenerator

Kako je ovo bitno pojednostavljen proračun o regeneratorsu neće biti previše riječi, već će se samo prikazati izmijenjeni toplinski tok potreban za predgrijavanje radne tvari nakon izlaska iz pumpe kao što to pokazuje sljedeća jednadžba:

$$\dot{Q}_{reg} = \dot{m}_{rt} \cdot (h_2 - h_3) \quad (5)$$

**Tablica 5. Vrijednosti za regenerator**

Parametar	Vrijednost	Mjerna jedinica
h2	299,77	kJ/kg
h3	115,26	kJ/kg
$\dot{Q}_{reg}$	4141,4	kW

#### 4.5. Termo ulje

Prije nastavka proračuna za isparivač, potrebno je odabrati prikladno termo ulje koje zadovoljava radne parametre u procesu (Tablica 1.)

Odabire se termo ulje THERMINOL®72 koje je predviđeno za prijenos topline u vrlo širokom rasponu temperatura od -14 °C do 380 °C. Ovo termo ulje pokazuje izvrsnu toplinsku stabilnost pri vrlo visokim temperaturama [11].

#### 4.6. Isparivač

Kako je za izmjenu topline između termo ulja i silikonskog ulja potrebno poznavati geometriju isparivača i koeficijente prijelaza topline, ovaj dio bi predstavljao znatne poteškoće s obzirom da ti podaci nisu poznati. Međutim, postoje dostupni podaci Turbodenovog ORC postrojenja (Tablica 6.) kojima će se služiti u proračunu pretpostavljajući da je ORC sposoban prilagoditi se različitim uvjetima s obzirom na ulaznu temperaturu i maseni protok termoulja koji predaje toplinski tok radnoj tvari u isparivaču. To može biti razumno uzimajući u obzir relativno spore promjene zbog tromosti sustava [4].

**Tablica 6. Promjena opterećenja ORC-a variranjem ulazne temperature ( $m_{tu}$ =konst.)[4]**

$\vartheta_{ul\_ORC}$ [°C]	$\vartheta_{izl\_ORC}$ [°C]	Toplinski učin [kW]	snaga ORC-a [kW]
300	240	5141	1043
280	232	3992	810
260	224	2959	582
240	213	2128	390

Iz Tablice 6 se vidi da se radi o istim temperaturama termo ulja na ulazu i izlazu iz isparivača za nominalnu snagu postrojenja, jedina razlika je upravo u snazi postrojenja od 1043 kW<sub>el</sub> u odnosu na onu zadanu (1000 kW<sub>el</sub>) i toplinskom učinku termouljnog kotla (5141 kW<sub>t</sub> u odnosu na zadani učin od 5050 kW<sub>t</sub>). Kako te razlike nisu prevelike i kako je ovaj dio proračuna bitno pojednostavljen u svrhu dobivanja zadovoljavajućih odziva napraviti će se nova tablica na temelju poznatih omjera između snage ORC-a i toplinskog učina s obzirom na ulaznu temperaturu termo ulja kao što je prikazano u tablici iznad.

Prije toga izračunati će se svojstva termo ulja na temelju poznatih temperatura na ulasku i izlasku iz izmjenjivača. Svojstva za THERMINOL®72 uzimaju se za srednju temperaturu izračunatu jednadžbom (6):

$$T_{sr\_tu} = \frac{T_{ul\_ORC} + T_{izl\_ORC}}{2} \quad (6)$$

Pretpostavlja se tijekom proračuna da se svojstva ne mijenjaju i da ostaju konstantna.

**Tablica 7. Svojstva termo ulja**

Fizikalna veličina	Vrijednost	Mjerna jedinica
$T_{sr\_tu}$	543,15	K
$\rho_{tu}$	852,6	kg/m <sup>3</sup>
$c_{tu}$	2229,7	J/kgK

Nakon što su poznata svojstva za termo ulje moguće je izračunati maseni protok koji je potreban da se izmijeni toplinski tok za predgrijavanje i isparavanje radne tvari. Prije toga prikazati će se samo kako je zamišljen proračun pomoću kojeg se došlo do potrebnog toplinskog toga koji se mora izmijenit u regeneratorsu (Tablica 5.)

Ukupan toplinski tok za slučaj kada nebi bilo regeneratorsa opisan je jednadžbom (7):

$$\dot{Q}_{isp\_uk} = \dot{m}_{rt} \cdot (h_1 - h_5) \quad (7)$$

Zatim se iz jednadžbe (8) dobije toplinski tok koji se mora osigurati u regeneratorsu i koji je jednak izmijenjenom toplinskom toku opisanom jednadžbom (9):

$$\dot{Q}_{pred} = \dot{Q}_{isp\_uk} - \dot{Q}_{tu} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{pred} = \dot{Q}_{reg} \quad (9)$$

**Tablica 8. Izmijenjeni toplinski tokovi u procesu**

$\dot{Q}_{tu}$	5050,5 kW
$\dot{Q}_{isp\_uk}$	9191,9 kW
$\dot{Q}_{pred}$	4141,4 kW

Maseni protok potreban da se izmijeni toplinski tok od  $\dot{Q}_{tu} = 5050,5$  kW računa se pomoću jednadžbe (10):

$$\dot{m}_{tu} = \frac{\dot{Q}_{tu}}{c_{tu} \cdot (T_{ul_{ORC}} - T_{izl_{ORC}})} \quad (10)$$

i iznosi  $\dot{m}_{tu} = 37.75$  [kg/s].

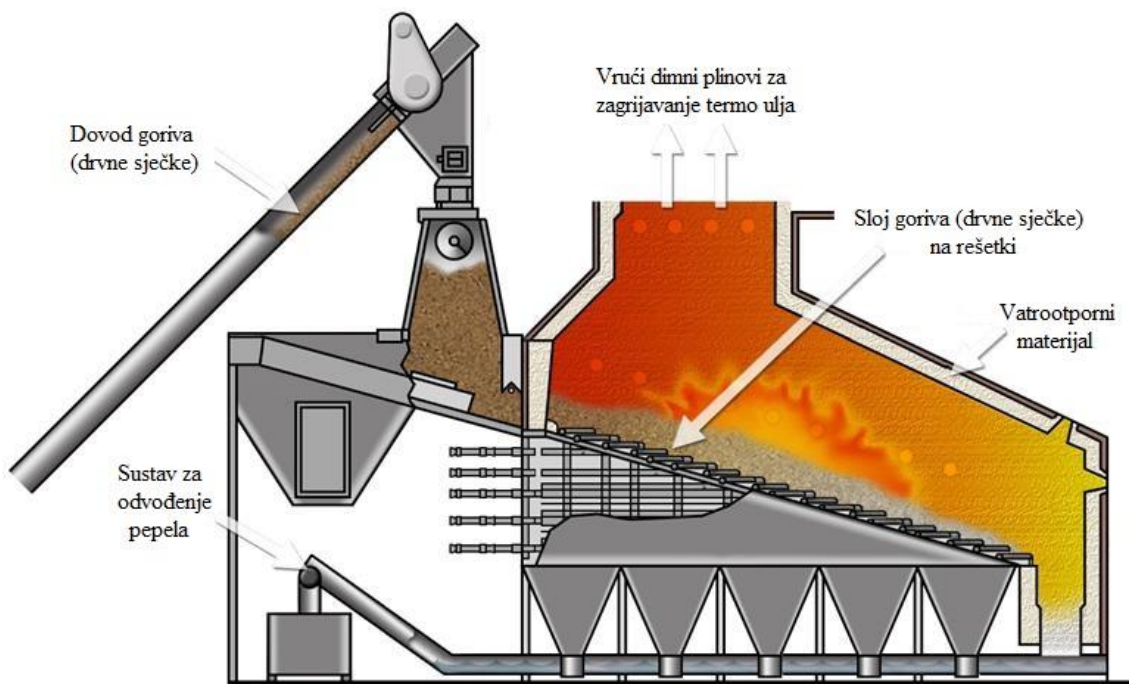
Ova komponenta pojednostavljenog sustava (Slika 8.) tijekom simulacije "ponašati" će se tako da se na temelju poznate temperature na ulazu u ORC dobije izlazna temperatura termo ulja pomoću Lookup tablica u *Simulinku*® interpoliranjem između dvije vrijednosti prikazane u Tablici 9, čime će se na analogan način doći do podatka o snazi na izlazu iz turbine.

**Tablica 9. Podaci za simulaciju ORC-a**

$\vartheta_{ul_{ORC}}$ [°C]	$\vartheta_{izl_{ORC}}$ [°C]	Toplinski učin [kW]	snaga ORC-a [kW]
300	240	5050	1000
280	232	3922	777
260	224	2907	558
240	213	2090	374

## 5. IZGARANJE BIOMASE NA REŠETKI

Svrha ovog poglavlja je detaljniji opis odvijanja procesa u ložištu prikazanog na Slici 7.



Slika 11. Izgaranje biomase na rešetki [12]

Izgaranje drva se odvija u šest osnovnih faza [1]:

- zagrijavanje drva;
- sušenje drva;
- pirolitička razgradnja drva;
- rasplinjavanje odvlaženih gorivih tvari;
- rasplinjavanje čvrstih ugljikovih spojeva;
- oksidacija zapaljivih plinova nastalih rasplinjavanjem.

**Zagrijavanje drva** je prva faza procesa izgaranja i odvija se na temperaturama do 100 °C. Pri tome je cilj drvo, odnosno biomasu (drvnu sječku) koja je u ložište dovedena na temperaturi na kojoj je uskladištena (najčešće 10-25 °C) predgrijati na temperaturu potrebnu za odvijanje daljnjih faza [1].

**Sušenje drva** je druga faza procesa izgaranja i u pravilu se odvija na temperaturama 100-150 °C. Pri tome se iz drva, odnosno biomase izdvaja sva preostala vlaga (voda) koja tada iz drva izlazi kao vodena para [1].

Trajanje faza zagrijavanja i sušenja te potrošnja energije pri njihovom odvijanju ponajviše ovisi o vlažnosti i dimenzijama biomase. Pri tome vrijedi da, što je ona manje vlažna i manjih dimenzija, treba kraće vrijeme za njezino zagrijavanje i sušenje [1].

**Pirolitička razgradnja drva** je treća faza procesa izgaranja i odvija se na temperaturama 150-230 °C. U toj se fazi složeni ugljikovi spojevi pod utjecajem topline razlažu na jednostavnije, pri čemu redovito nastaju i štetni produkti izgaranja kao što su spojevi katrana (u kapljevitom stanju) te ugljikov monoksid i viši ugljikovodici (u plinovitom stanju). Za odvijanje te faze nije nužna prisutnost kisika [1].

Faze zagrijavanja, sušenja i pirolitička razgradnja su endotermne, što znači da za njihovo odvijanje treba dovoditi toplinu izvana. Tek na temperaturama višim od 230 °C započinju egzotermne reakcije, pri čijem se odvijanju oslobađa toplina. Inače, za zapaljenje drva, odnosno šumske biomase uz prisutnost vanjskog izvora zapaljenja treba postići temperaturu višu od 300 °C, a za njihovo samozapaljenje temperaturu višu od 400 °C [1].

**Rasplinjavanje odvlaženih gorivih tvari** je četvrta faza izgaranja drva i odvija se na temperaturama 230 – 500 °C i uz prisutnost kisika. Dolazi do termičke razgradnje gorivih tvari u kojima više nema vlage (vode). Ta se faza prije svega odvija u zoni ložišta u kojemu se nalazi sloj biomase i u koju se dovodi primarni zrak (kisik) koji odmah reagira s plinovitim produktima rasplinjavanja pri čemu se oslobađa toplina koja istodobno služi za paljenje čvrstih i kapljevutih produkata pirolize (katrana i ugljena) [1].

**Rasplinjavanje čvrstih ugljikovih spojeva** je peta faza izgaranja drva i odvija se na temperaturama 500 – 700 °C. Uz prisutnost ugljikovog dioksida, vodene pare i kisika, pri tome nastaje zapaljivi CO. Ta je reakcija egzotermna, no osim topline, tada se prvi put oslobađa i svjetlost, što se vidi kao plamen [1].

**Oksidacija zapaljivih plinova** nastalih rasplinjavanjem je šesta i posljednja faza izgaranja drva, a odvija se na temperaturama 700 – 1400 °C. Do oksidacije dolazi u reakcijskoj zoni ložišta, u kojoj se nalaze produkti svih ranijih reakcija u plinovitom stanju i u koju se dovodi sekundarni zrak, što je osnovna pretpostavka za čisto i potpuno izgaranje [1].

Za odvijanje svih tih faza moraju biti zadovoljene sljedeće osnovne tehničke pretpostavke [1]:

- u ložištu treba biti više zraka za izgaranje (kisika) nego što je potrebno, odnosno uvijek mora postojati suvišak zraka za izgaranje;
- u ložištu treba ostvariti dobro miješanje zapaljivih plinova nastalih rasplinjavanjem i dovedenog zraka za izgaranje;
- u reakcijskoj zoni ložišta treba omogućiti dovoljno dugo zadržavanje nastale smjese zapaljivih plinova nastalih rasplinjavanjem i zraka za izgaranje;
- u ložištu uvijek treba biti razmjerno visoka temperatura.

Suvremena ložišta na šumsku ili drvenu biomasu izvedena su tako da zadovoljavaju sve spomenute pretpostavke. Pri tome se dobava zraka za izgaranje najčešće ostvaruje na dva načina. Prvi način podrazumijeva dovođenje jednog dijela zraka, tzv. primarnog zraka, u zonu ložišta u kojem se nalazi sloj biomase i u kojem se ona zagrijava, suši i razgrađuje, dok drugi način podrazumijeva dovođenje drugog dijela zraka, tzv. sekundarnog zraka, u reakcijsku zonu ložišta, u kojoj se nalaze plinovi nastali rasplinjavanjem i u kojoj se odvija njihova oksidacija. Takvo dovođenje zraka osnovni je preduvjet ravnomjernog izgaranja šumske biomase u ložištu uz što manje štetnih emisija [1].

Kako bi se ostvarila velika učinkovitost procesa izgaranja, odnosno veliki stupanj djelovanja ložišta na biomasu, u svim fazama izgaranja treba postići optimalne uvjete za odvijanje procesa, što se posebice odnosi na dovođenje primarnog i sekundarnog zraka. U suvremenim izvorima topline na biomasu to se omogućava elektronički reguliranim ventilatorima, odnosno sapnicama i zaklopkama za zrak. Uz to, reguliranom promjenom količine primarnog zraka kod suvremenih kotlova na biomasu moguće je mijenjati učin samog kotla, dok se reguliranom promjenom količine sekundarnog zraka osigurava uvijek optimalno izgaranje zapaljivih plinova nastalih rasplinjavanjem. Zahvaljujući tome, kod takvih su kotlova značajno smanjene štetne emisije plinova, a posebice u kritičnoj, početnoj fazi cijelog procesa [1].

## 6. TERMODINAMIČKI PRORAČUN IZGARANJA

Proračun će biti izveden uz pomoć već gotovih formula iz navedene literature [13], pretpostavljati će se potpuno izgaranje biomase (drvene sječke) poznatog kemijskog sastava (zanemaren udio pepela) uz faktor pretička zraka  $\lambda=1,4$  i smatrati će se da nema toplinskih gubitaka kroz stijenske ložišta.

**Tablica 10. Kemijski sastav drvene sječke**

Kemijski element	Simbol	Maseni udio, %	Mjerna jedinica
Ugljik	c	31,20	kgC/kgG
Vodik	h	3,90	kgH <sub>2</sub> /kgG
Kisik	o	24,60	kgO <sub>2</sub> /kgG
Dušik	n	0,30	kgN <sub>2</sub> /kgG
Vlaga	w	40,00	kgH <sub>2</sub> O/kgG

Minimalna masa kisika računa se prema jednadžbi (11):

$$o_{min} = 2,666 \cdot c + 8 \cdot h - o \quad (11)$$

Budući da se kisik potreban za izgaranje dovodi najčešće s atmosferskim zrakom, minimalna potrebna masa zraka, izražena u kilogramima zraka po kilogramu goriva, zbog masenog udjela u njemu  $x_{O_2}=0,232$  iznosi:

$$l_{min} = \frac{o_{min}}{0,232} \quad (12)$$

Ogrjevna vrijednost goriva računa se prema jednadžbi (13):

$$\Delta h_d = 33900 \cdot c + 117000 \left( h - \frac{o}{8} \right) - 2500 \cdot w \quad (13)$$

Mase pojedinih sudionika u dimnim plinovima računaju se prema sljedećim jednadžbama:

$$m_{CO_2} = 3,666 \cdot c \quad (14)$$

$$m_{O_2} = (\lambda - 1) \cdot o_{min} \quad (15)$$

$$m_{N_2} = n + 0,768 \cdot \lambda \cdot l_{min} \quad (16)$$

$$m_{H_2O} = 9 \cdot h + w \quad (17)$$



Ukupna masa vlažnih dimnih plinova jednaka je:

$$m_{vdp} = m_{CO_2} + m_{O_2} + m_{N_2} + m_{H_2O} \quad (18)$$

Maseni udio pojedinog plina u vlažnim dimnim plinovima računa se prema jednadžbi (19)

$$x_i = \frac{m_i}{m_{dp}} \quad (19)$$

Adijabatska temperatura izgaranja računa se prema jednadžbi (20). U proračunu će se upravo koristiti adijabatska temperatura izgaranja jer su nepoznati toplinski gubici kroz ložište i zbog pojednostavljenja izračuna pretpostavlja se da zrak i gorivo ulaze u ložište s temperaturom od 0 °C. U nazivniku jednadžbe (20) pojavljuje se srednji specifični toplinski kapacitet dimnih plinova koji zahtjeva poznavanje upravo adijabatske temperature izgaranja. Zbog toga ovo zahtjeva iteracijski postupak rješavanja koji je proveden u *Excelu*.

$$\vartheta_{ad} = \frac{\Delta h_d}{m_{vdp} \cdot \sum_{i=1}^4 x_i \cdot [c_{pi}]_0^{\vartheta_{ad}}} \quad (20)$$

**Tablica 11. Minimalna potrebna masa kisika i zraka**

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
$O_{min}$	0,8978	kgO <sub>2</sub> /kgG
$I_{min}$	3,8698	kg <sub>zr</sub> /kgG

**Tablica 12. Mase pojedinih sudionika u dimnim plinovima**

Plin	Udio	Mjerna jedinica
CO <sub>2</sub>	1,1438	kgCO <sub>2</sub> /kgG
O <sub>2</sub>	0,3591	kgO <sub>2</sub> /kgG
N <sub>2</sub>	4,1638	kgN <sub>2</sub> /kgG
H <sub>2</sub> O	0,7510	kgH <sub>2</sub> O/kgG

**Tablica 13. Ogrjevnost goriva i masa dimnih plinova**

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
$\Delta h_d$	10542,05	kJ/kgG
$m_{vdp}$	6,418	kg <sub>vdp</sub> /kgG

Kako je tijekom iterativnog proračuna dobiven srednji molarni specifični toplinski kapacitet zbog poznavanja njegovog iznosa za pojedini plin iz toplinskih tablica [14], potrebno ga je preračunati u srednji specifični toplinski kapacitet pomoću jednadžbe (21):

$$[c_{pdp}]_0^{v_{ad}} = \frac{[C_{mpdp}]_0^{v_{ad}}}{M_{dp\_mol}} \quad (21)$$

Za izračunavanje molarne mase dimnih plinova potrebno je prethodno izračunati količine pojedinog plina po jedinici mase goriva pomoću jednadžbe (22):

$$n_i = \frac{m_i}{M_i} \quad (22)$$

gdje je  $M_i$  molarna masa pojedinog plina čije se vrijednosti mogu pronaći također u toplinskim tablicama [14]. Zatim je moguće izračunati ukupnu količinu vlažnih dimnih plinova kako to pokazuje jednadžba (23) i zatim molne udjele pomoću jednadžbe (24):

$$n_{vdp} = \sum_{i=1}^4 n_i \quad (23)$$

$$y_i = \frac{n_i}{n_{vdp}} \quad (24)$$

**Tablica 14. Količine pojedinih sudionika u dimnim plinovima**

Plin	$n_i$	Mjerna jedinica	Molarna masa
CO <sub>2</sub>	0,0260	kmolCO <sub>2</sub> /kgG	44,01
O <sub>2</sub>	0,0112	kmolO <sub>2</sub> /kgG	32
N <sub>2</sub>	0,1486	kmolN <sub>2</sub> /kgG	28,016
H <sub>2</sub> O	0,0417	kmolH <sub>2</sub> O/kgG	18,02

**Tablica 15. Maseni i molni udeli**

Plin	Maseni udio	Oznaka	Molni udio	Oznaka
CO <sub>2</sub>	0,1782	x_CO <sub>2</sub>	0,1142	y_CO <sub>2</sub>
O <sub>2</sub>	0,0560	x_O <sub>2</sub>	0,0493	y_O <sub>2</sub>
N <sub>2</sub>	0,6488	x_N <sub>2</sub>	0,6533	y_N <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> O	0,1170	x_H <sub>2</sub> O	0,1832	y_H <sub>2</sub> O
Σ	1		1	

Molarna masa dimnih plinova sada se poznavanjem vrijednosti prikazanih u Tablici 14 i 15, računa pomoću jednadžbe (25):

$$M_{dp\_mol} = \sum_{i=1}^4 y_i \cdot M_i \quad (25)$$

Srednji molarni toplinski kapacitet se računa prema jednadžbi (26):

$$[C_{mpdp}]_0^{v_{ad}} = \sum_{i=1}^4 y_i \cdot [C_{mpi}]_0^{v_{ad}} \quad (26)$$

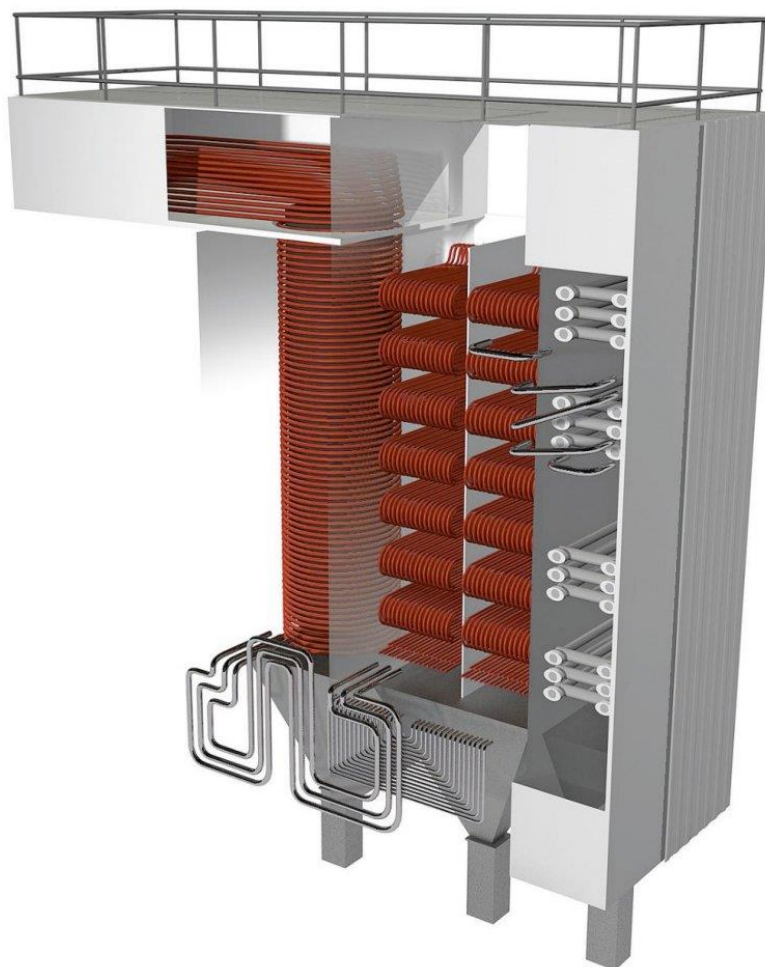
Konačno, nakon provedenog iterativnog postupka u *Excelu*, molarna masa dimnih plinova i relevantne vrijednosti su prikazane u Tablici 16.

**Tablica 16. Rezultati iterativnog proračuna**

$M_{dp\_mol}$	28,21 [kg <sub>vdp</sub> /kmol <sub>vdp</sub> ]
$v_{ad}$	1292,3 [°C]
$[C_{mpdp}]_0^{1292,3}$	35,855 [kJ/kmol <sub>vdp</sub> ]
$[c_{pdp}]_0^{1292,3}$	1,271 [kJ/kg <sub>vdp</sub> ]

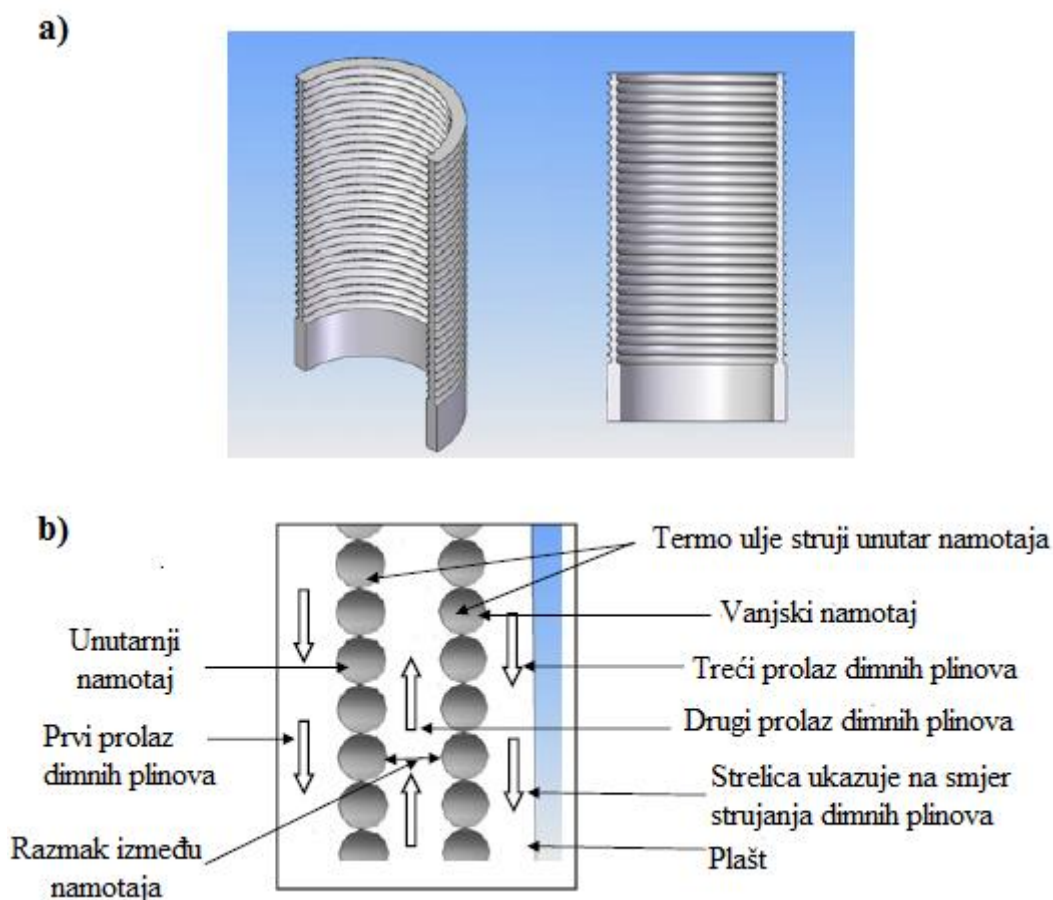
## 7. MODELIRANJE TERMOULJNOG KOTLA

Ovo je najbitniji dio proračuna kojemu će se iz tog razloga posvetiti najviše pažnje. Naime kako ovo nije klasičan izmjenjivač topline poput "Shell&Tube" izvedbe, nego je riječ o cilindrično savijenim cijevnim spiralama kroz koje cirkulira termo ulje kao što se može vidjeti na Slici 12 na kojoj je prikazan izdvojen termouljni kotao kotlovskog postrojenja sa Slike 7.



Slika 12. Termouljni kotao [16]

Kako bi se mogli izračunati koeficijenti prijelaza topline na strani dimnih plinova i unutar cijevi kroz koje struji termo ulje poslužiti će se već dobivenim eksperimentalnim podacima [15] za sličan izmjenjivač. Poznavajući svojstva termoulja i pretpostavljajući temperaturu dimnih plinova na izlazu iz izmjenjivača, biti će moguće izračunati koeficijent prolaza topline za ovakav tip izmjenjivača uvodeći bitna pojednostavljenja.



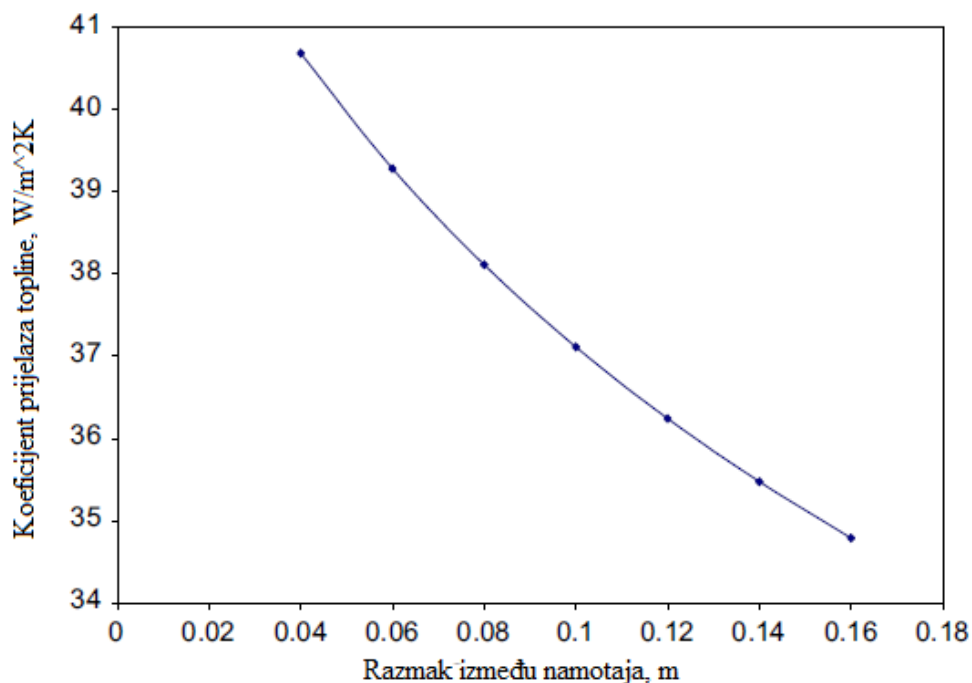
Slika 13. a) Prikaz presjeka namotaja b) Strujanje dimnih plinova u tri prolaza [15]

Za izvedbu termouljnog kotla u stojećoj izvedbi, koji je postavljen iza komore ložišta (Slika 7.) obično je u prvom prolazu dimnih plinova toplina većim dijelom izmijenjena zračenjem gdje dimni plinovi polako putuju dižući se prema gore. Nakon toga skreću u drugi prolaz gdje se ubrzavaju i toplina se izmjenjuje isključivo konvekcijom. Isto vrijedi i za treći prolaz.

Za modeliranje izmjenjivača termouljnog kotla potrebo je uvesti sljedeće pretpostavke:

- izmjenjivač je sveden na onaj klasičan "Shell&tube" izmjenjivač i pri tome se pretpostavlja da dimni plinovi struje oko cijevi jednakom brzinom izmjenjujući toplinu samo konvekcijom kroz promjer definiran razmakom između namotaja (Slika 14.);
- dimni plinovi ulaze u izmjenjivač sa adijabatskom temperaturom izgaranja pri tlaku od  $p_{dp} = 1$  bar (kako bi se mogla izračunati svojstva za dimne plinove) i izlaze s temperaturom oko  $\vartheta_{izl_{dp}} = 350$  °C;

- maseni protok termo ulja se dijeli kao da struji kroz tri cijevne spirale preko kojih struje dimni plinovi, te će se onda izdvojiti jedna reprezentativna cijev na temelju koje će se izvesti matematički model ovako pojednostavljenog procesa izmjene topline.



**Slika 14. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline dimnih plinova o razmaku između namotaja [15]**

Za nastavak proračuna odabire se razmak između namotaja  $\delta_{nam} = 0,05 \text{ m}$ . Na Slici 14 se vidi da koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova iznosi:  $\alpha_{dp} = 40 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ .

Za izračun svojstva dimnih plinova izračunava se plinska konstanta pomoću jednadžbe (27):

$$R_{dp} = \sum_{i=1}^4 x_i \cdot R_i \quad (27)$$

Gustoća dimnih plinova se računa pomoću jednadžbe (29) za srednju temperaturu definiranu jednadžbom (28):

$$T_{sr\_dp} = \frac{T_{ad} + T_{dp\_izl}}{2} \quad (28)$$

$$\rho_{dp} = \frac{p_{dp}}{R_{dp} \cdot T_{sr\_dp}} \quad (29)$$

Srednji specifični toplinski kapacitet dobije se iz jednadžbe (30), dok se srednji molarni toplinski kapacitet izračunava pomoću jednadžbe (31) iz toplinskih tablica [14]. Račun za interpoliranje između dviju temperatura proveden je u *Excelu*.

$$[c_{pdp}]_{350}^{1292,3} = \frac{[C_{mpdp}]_{350}^{1292,3}}{M_{dp\_mol}} \quad (30)$$

$$[C_{mpdp}]_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} = \frac{[C_{mpdp}]_0^{\vartheta_2} \cdot \vartheta_2 - [C_{mpdp}]_0^{\vartheta_1} \cdot \vartheta_1}{\vartheta_2 - \vartheta_1} \quad (31)$$

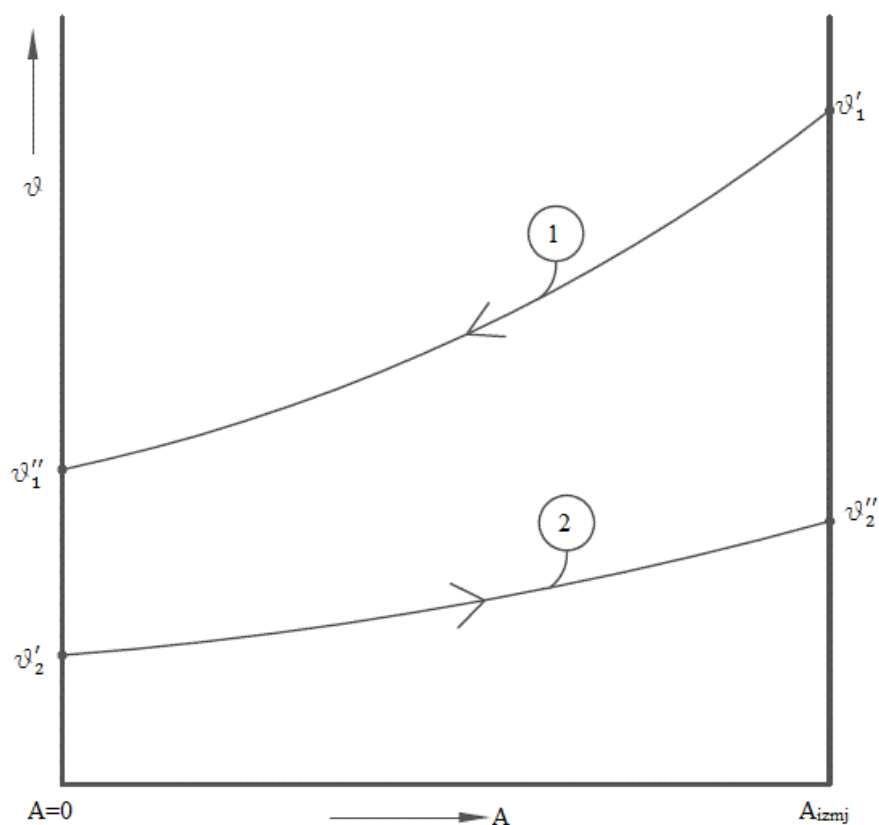
**Tablica 17. Plinske konstante**

Plin	R, J/kgK
CO <sub>2</sub>	188,912
O <sub>2</sub>	259,813
N <sub>2</sub>	296,759
H <sub>2</sub> O	461,376

**Tablica 18. Vrijednosti za dimne plinove**

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
R <sub>dp</sub>	294,73	J/kgK
T <sub>ad</sub>	1565,45	K
T <sub>dp_izl</sub>	623,15	K
T <sub>sr_dp</sub>	1094,30	K
ρ <sub>dp</sub>	0,3101	kg/m <sup>3</sup>
$[C_{mpdp}]_0^{1292,3}$	35,855	kJ/kmolK
$[C_{mpdp}]_0^{350}$	32,013	kJ/kmolK
$[C_{mpdp}]_{350}^{1292,3}$	37,282	kJ/kmolK
$[c_{pdp}]_{350}^{1292,3}$	1,323	kJ/kgK

Dimenzije izmjenjivača određuju se pomoću pi-parametara za protusmjerni izmjenjivač topline iz navedene literature [13].



**Slika 15. Temperature struja kod protusmjernog rekuperatora**

Prije početka dimenzioniranja izmjenjivača potrebno je odrediti maseni protok dimnih plinova da bi se ostvario toplinski učin potreban za zagrijavanje termo ulja sa 240 °C na 300 °C. Kako se pretpostavilo da nema gubitaka u ložištu i da se računa sa adijabatskom temperaturom izgaranja, da bi dimni plinovi predali potreban toplinski tok za zagrijavanje termo ulja i pritom se ohladili sa 1292,3 °C na pretpostavljenu temperaturu na izlazu od 350 °C, potrebno je povećati maseni protok goriva. Maseni protok dimnih plinova se računa prema jednadžbi (32):

$$\dot{m}_{dp} = \dot{m}_G \cdot m_{vdp} \quad (32)$$



**Tablica 19. Potreban maseni protok dimnih plinova**

$\dot{m}_G$	0,6312 [kgG/s]
$\dot{m}_{dp}$	4,051 [kg <sub>dp</sub> /s]

Nakon povećanog protoka goriva toplinski tok koji predaju dimni plinovi izračunat je jednadžbom (33):

$$\dot{Q}_{dp} = \dot{m}_{dp} \cdot [c_{pdp}]_{350}^{1292,3} \cdot (T_{ad} - T_{dp\_izl}) = 5050,23 \text{ kW} \quad (33)$$

Iz prethodno izračunatih svojstava za termoulje (Tablica 7.) i masenog protoka definiranog jednadžbom (10), moguće je izračunati toplinski kapacitet termo ulja koji je ujedno i jača struja u ovom slučaju (Slika 15.).

$$C_2 = C_{tu} = \dot{m}_{tu} \cdot c_{tu} \quad (34)$$

Slabija struja je struja dimnih plinova kako to prikazuje jednadžba (35), te se zatim računa pi-parametar pomoću jednadžbe (36). Potrebno je napomenuti da će se umjesto srednjeg specifičnog toplinskog kapaciteta  $[c_{pdp}]_{350}^{1292,3}$  pisati samo  $c_{dp}$ .

$$C_1 = C_{dp} = \dot{m}_{dp} \cdot c_{dp} \quad (35)$$

$$\Pi_3 = \frac{C_1}{C_2} \quad (36)$$

Kako su poznate temperature struja na ulazu i izlazu iz izmjenjivača, moguće je odrediti sljedeći pi-parametar definiran jednadžbom (37):

$$\Pi_1 = \frac{\vartheta'_1 - \vartheta''_1}{\vartheta'_1 - \vartheta'_2} = \frac{\vartheta_{ad} - \vartheta_{izl\_dp}}{\vartheta_{ad} - \vartheta_{ul\_ORC}} \quad (37)$$

Poznavanjem dva pi-parametra izračunata jednadžbama (36) i (37), moguće je odrediti treći pomoću funkcijske veze prikazane jednadžbom (38) koja vrijedi za protusmjerni izmjenjivač topline.

$$\Pi_2 = \frac{\ln \frac{1 - \Pi_1}{1 - \Pi_1 \cdot \Pi_3}}{-(1 - \Pi_3)} \quad (38)$$

Iz  $\Pi_2$ -parametra moguće je odrediti potrebnu površinu izmjene topline kako to pokazuje jednačba (39), no prije toga potrebno je odrediti koeficijent prolaza topline.

$$\Pi_2 = \frac{k \cdot A_{izmj}}{C_1} \quad (39)$$

Za određivanje koeficijenta prolaza topline potrebni su podaci o materijalu cijevi izmjenjivača, te koeficijent prijelaza topline na strani termo ulja.

**Tablica 20. Geometrijski podaci i svojstva materijala cijevi**

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
$D_u$	80	mm
$t$	7	mm
$D_v$	94	mm
$c_{st}$	500	J/kgK
$\rho_{st}$	7500	kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{st}$	50	W/mK
$A_u$	0,0050265	m <sup>2</sup>
$A_v$	0,0069398	m <sup>2</sup>

Brzinu termo ulja računa se pomoću jednačbe (40) uz navedene pretpostavke spomenute na početku poglavlja.

$$v_{tu} = \frac{\dot{m}_{tu}}{3 \cdot \rho_{tu} \cdot A_u} \quad (40)$$

Zatim je moguće izračunati Reynoldsov broj prema jednačbi (41) u kojoj dinamičku viskoznost kao i Prandtlov broj dobivamo iz prije spomenute aplikacije *CoolProp*®.

$$Re_{tu} = \frac{\rho_{tu} \cdot v_{tu} \cdot D_u}{\mu_{tu}} \quad (41)$$

Nusseltov broj (42) računamo iz navedene literature [4] i nakon toga konačno izračunavamo koeficijent prijelaza topline prema jednačbi (43) gdje se toplinska provodnost također dobiva putem aplikacije *CoolProp*® kao što će se koristiti i za sva svojstva ubuduće.

$$Nu_{tu} = 0,023 \cdot Re_{tu}^{0,8} \cdot Pr_{tu}^{0,4} \quad (42)$$

$$\alpha_{tu} = \frac{\lambda_{tu} \cdot Nu_{tu}}{D_u} \quad (43)$$

Tablica 21. Vrijednosti za protusmjerni izmjenjivač topline

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
$C_1$	5359,8	W/K
$C_2$	84175	W/K
$\Pi_3$	0,0637	-
$\Pi_1$	0,8955	-
$\Pi_2$	2,3491	-
$v_{tu}$	2,9365	m/s
$\mu_{tu}$	0,00028327	Pa·s
$Pr_{tu}$	5,7817	-
$Re_{tu}$	707030	-
$Nu_{tu}$	2218,7	-
$\lambda_{tu}$	0,1092	W/mK
$\alpha_{tu}$	3029,7	W/m <sup>2</sup> K

Nakon izračuna svih potrebnih podataka moguće je izračunati koeficijent prolaza topline svedenog na vanjsku površinu prema jednadžbi (44) i zatim potrebnu površinu izmjene topline prema jednadžbi (45).

$$k_{tk} = \frac{1}{\frac{D_v}{D_u \cdot \alpha_{tu}} + \frac{D_v}{2 \cdot \lambda_{st}} \cdot \ln\left(\frac{D_v}{D_u}\right) + \frac{1}{\alpha_{dp}}} \quad (44)$$

$$A_{izmj} = \frac{\Pi_2 \cdot C_1}{k_{tk}} \quad (45)$$

Iz ukupne površine izmjene topline moguće je izračunati ukupnu duljinu izmjenjivača pomoću jednadžbe (46) i moguće je izvođenje matematičkog modela za termouljni kotao.

$$L_{izmj} = \frac{A_{izmj}}{D_v \cdot \pi} \quad (46)$$

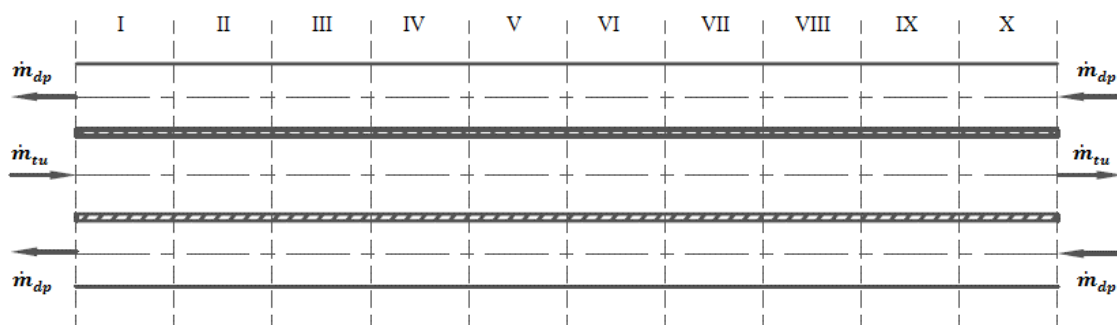
**Tablica 22. Podaci za matematički model termouljnog kotla**

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
$k_{tk}$	39,1552	W/m <sup>2</sup> K
$A_{izmj}$	321,56	m <sup>2</sup>
$L_{izmj}$	1088,9	m

### 7.1. Pojednostavljeni matematički model termouljnog kotla

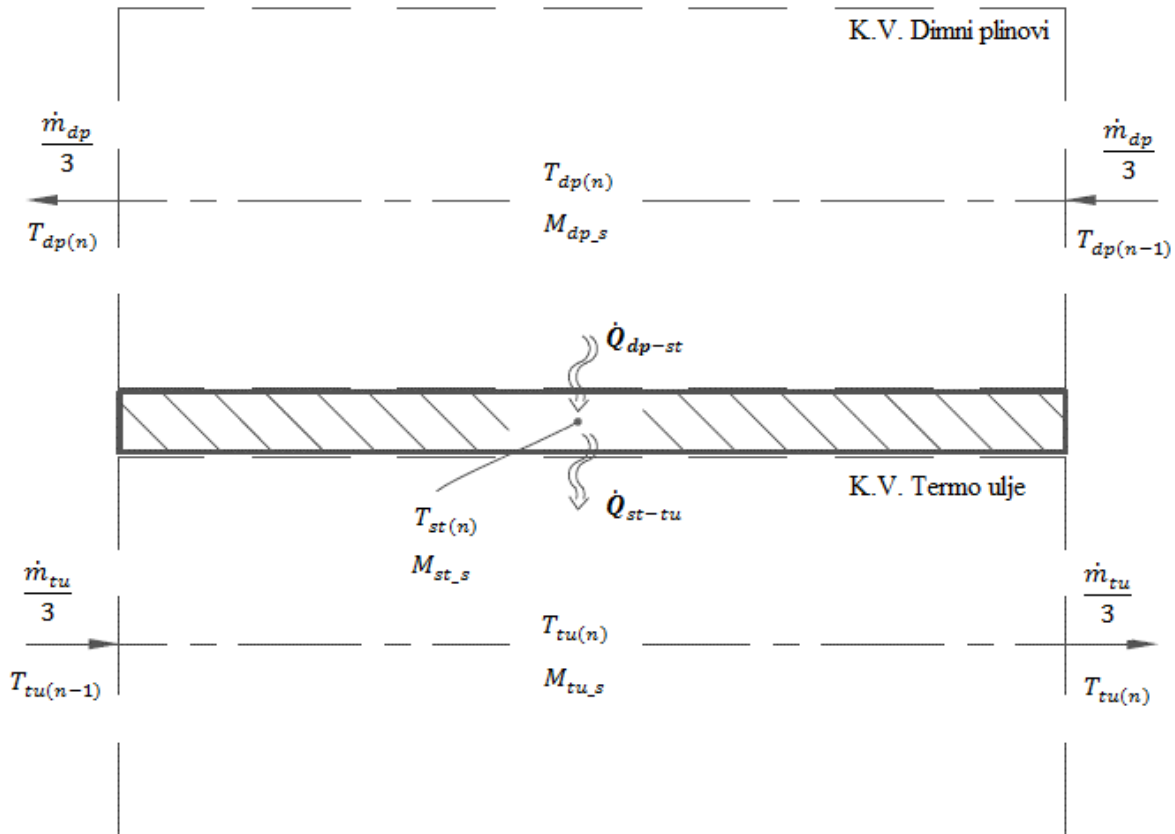
Za izvođenje matematičkog modela termouljnog kotla uvode se sljedeće pretpostavke:

- Termouljni kotao se promatra kao jedna ravna cijev oko koje protusmjerno struje dimni plinovi;
- Radi velike duljine izmjenjivača, cijev je podijeljena na 10 segmenata radi točnijih rezultata;
- Izmjena topline dimnih plinova sa okolinom se zanemaruje;
- Svojstva materijala cijevi, dimnih plinova i termo ulja su konstantna;
- Toplinski tok provođenjem kroz stijenku cijevi u aksijalnom smjeru se zanemaruje.



**Slika 16. Cijev podijeljena na 10 segmenata**

Radi boljeg pregleda izdvaja se jedan segment cijevi na temelju kojega se izvodi matematički model.



Slika 17. Segment cijevi

Jednadžbe bilance energije izvede se posebno za dimne plinove, stijenku cijevi i za termičko ulje, te se pri tome koristi metoda kontrolnih volumena.

#### Jednadžba bilance energije za dimne plinove:

$$M_{dp_s} \cdot c_{dp} \cdot \frac{dT_{dp(n)}}{dt} = \frac{1}{3} \cdot \dot{m}_{dp} \cdot c_{dp} \cdot (T_{dp(n-1)} - T_{dp(n)}) - k_{dp\_st} \cdot A_{dp\_st\_s} \cdot (T_{dp(n)} - T_{st(n)}) \quad (47)$$

gdje je:

- $M_{dp\_s}$  – masa dimnih plinova za segment cijev [kg];
- $k_{dp\_st}$  – koeficijent prolaza topline između dimnih plinova i stijenke cijevi [ $W/m^2K$ ];
- $A_{dp\_st\_s}$  – površina izmjene topline segmenta cijevi za koju se svodi  $k_{dp\_st}$  [ $m^2$ ];
- $n$  – segment cijevi,  $n=1,2,...,10$ .

**Jednadžba bilance energije za stijenku cijevi:**

$$M_{st\_s} \cdot c_{st} \cdot \frac{dT_{st(n)}}{dt} = k_{dp\_st} \cdot A_{dp\_st\_s} \cdot (T_{dp(n)} - T_{st(n)}) - k_{st\_tu} \cdot A_{st\_tu\_s} \cdot (T_{st(n)} - T_{tu(n)}) \quad (48)$$

gdje je:

- $M_{st\_s}$  – masa stijenke za segment cijevi [kg];
- $k_{st\_tu}$  – koeficijent prolaza topline između stijenke i termo ulja [ $W/m^2K$ ];
- $A_{st\_tu\_s}$  – površina izmjene topline segmenta cijevi za koju se svodi  $k_{st\_tu}$  [ $m^2$ ].

**Jednadžba bilance energije za termo ulje:**

$$M_{tu\_s} \cdot c_{tu} \cdot \frac{dT_{tu(n)}}{dt} = \frac{1}{3} \cdot \dot{m}_{tu} \cdot c_{tu} \cdot (T_{tu(n-1)} - T_{tu(n)}) + k_{st\_tu} \cdot A_{st\_tu\_s} \cdot (T_{st(n)} - T_{tu(n)}) \quad (49)$$

gdje je:

- $M_{tu\_s}$  – masa termo ulja za segment cijevi [kg].

Koeficijenti koji uključuju prijelaz topline sa dimnih plinova i termoulja na stijenku i obrnuto te provođenje do sredine stijenke računaju se prema jednadžbama (50) i (51):

$$k_{dp\_st} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{dp}} + \frac{D_v}{2 \cdot \lambda_{st}} \cdot \ln\left(\frac{D_v}{D_v - t}\right)} \quad (50)$$

$$k_{st\_tu} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{tu}} + \frac{D_u}{2 \cdot \lambda_{st}} \cdot \ln\left(\frac{D_u + t}{D_u}\right)} \quad (51)$$

Površina izmjene topline za dimne plinove definirana je jednadžbom (52), a za termoulje jednadžbom (53).

$$A_{dp\_st} = \frac{L_{izmj}}{n_c} \cdot D_v \cdot \pi = \frac{A_{dp\_st\_uk}}{n_c} \quad (52)$$

gdje je:

- $n_c$  – broj cijevi kroz koje struji termo ulje [-]

$$A_{st\_tu} = \frac{L_{izmj}}{n_c} \cdot D_u \cdot \pi = \frac{A_{st\_tu\_uk}}{n_c} \quad (53)$$

Masa dimnih plinova unutar izmjenjivača prikazana je jednačbom (54):

$$M_{dp} = \rho_{dp} \cdot (A_{v\_dp} - A_v) \cdot \frac{L_{izmj}}{n_c} = \frac{M_{dp\_uk}}{n_c} \quad (54)$$

Površina vanjskog presjeka cijevi za dimne plinove definirana je razmakom između namotaja cijevi i izračunava se pomoću jednačbe (55):

$$A_{v\_dp} = \frac{(D_v + 2 \cdot \delta_{nam})^2 \cdot \pi}{4} \quad (55)$$

Mase dimnih plinova za segment cijevi jednaka je:

$$M_{dp\_s} = \frac{M_{dp}}{10} \quad (56)$$

Masa stijenke cijevi jednaka je:

$$M_{st} = \rho_{st} \cdot (A_v - A_u) \cdot \frac{L_{izmj}}{n_c} = \frac{M_{st\_uk}}{n_c} \quad (57)$$

Masa termo ulja jednaka je:

$$M_{tu} = \rho_{tu} \cdot A_u \cdot \frac{L_{izmj}}{n_c} = \frac{M_{tu\_uk}}{n_c} \quad (58)$$

Masu termo ulja i stijenke cijevi za segment prikazuju jednačbe (59) i (60):

$$M_{tu,s} = \frac{M_{tu}}{10} \quad (59)$$

$$M_{st,s} = \frac{M_{st}}{10} \quad (60)$$

**Tablica 23. Izračunate vrijednosti za matematički model termouljnog kotla**

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
$k_{dp\_st}$	39,884	W/m <sup>2</sup> K
$k_{st\_tu}$	2517,8	W/m <sup>2</sup> K
$A_{dp\_st\_uk}$	321,56	m <sup>2</sup>
$A_{st\_tu\_uk}$	273,67	m <sup>2</sup>
$A_{dp\_st}$	107,19	m <sup>2</sup>
$A_{st\_tu}$	91,22	m <sup>2</sup>
$A_{v\_dp}$	0,0296	m <sup>2</sup>
$M_{dp\_uk}$	7,6367	kg
$M_{st\_uk}$	15624,753	kg
$M_{tu\_uk}$	4666,3	kg
$M_{dp}$	2,546	kg
$M_{st}$	5208,251	kg
$M_{tu}$	1555,442	kg



## 8. MATEMATIČKI MODEL POVRATNE I DOBAVNE CIJEVI

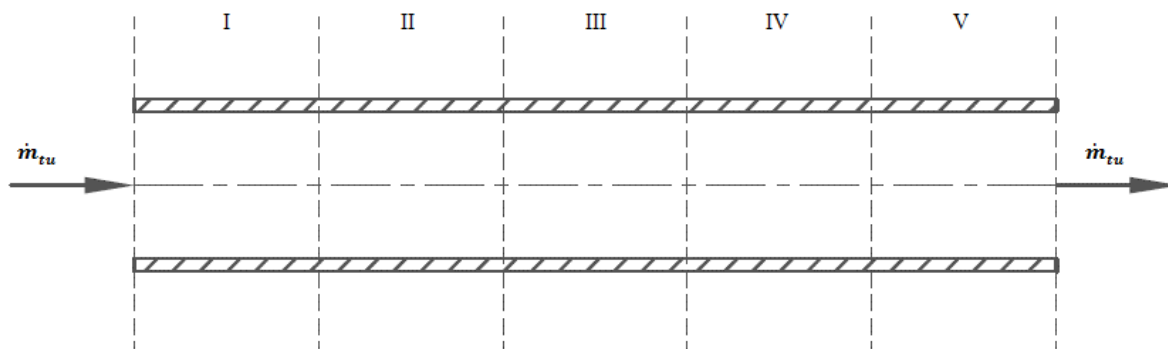
Slika 8 prikazuje povezanost ORC modula i termouljnog kotla pomoću dobavne i povratne cijevi kroz koju struji termo ulje koje je posrednik u prijenosu topline između dimnih plinova nastalih izgaranjem drvene sječke i silikonskog ulja u ORC modulu. Utjecaj svake cijevi mora se uzeti u obzir jer nisu zanemarivih duljina i imaju masu koja utječe na tromost sustava.

Prilikom izvođenja matematičkog modela za povratnu i dobavnu cijev uvedene su sljedeće pretpostavke:

- Povratna i dobavna cijev jednakih su duljina i od istog materijala, tako da će se izvest matematički model za samo jednu cijev;
- Svojstva cijevi ista su kao kod termouljnog kotla i ostaju konstantna;
- Zanemaruju se hidraulički gubici i izmjena topline sa okolinom;
- Radi točnijih rezultata cijev je podijeljena na 5 segmenata.

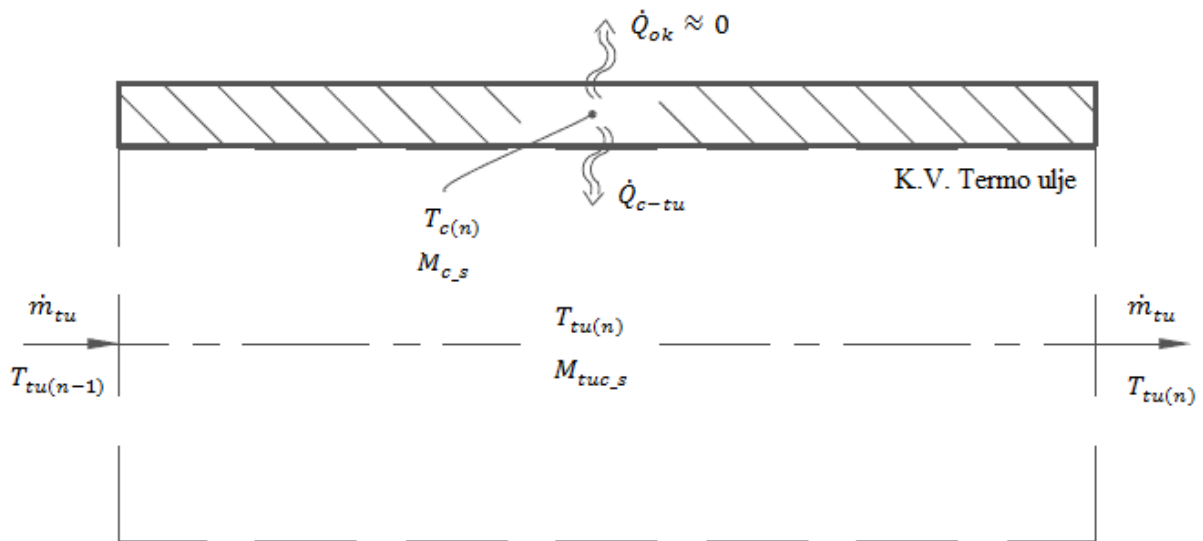
**Tablica 24. Geometrijski podaci za dobavnu i povratnu cijev [4]**

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
$D_{c\_u}$	150	mm
$t_c$	10	mm
$D_{c\_v}$	170	mm
$L_c$	50	m



**Slika 18. Povratna i dobavna cijev podijeljena na segmente**

Analogno kao i za termouljni kotao izdvojiti će se jedan segment cijevi.



Slika 19. Segment povratne i dobavne cijevi

**Jednadžba bilance energije za cijev:**

$$M_{c_s} \cdot c_{st} \cdot \frac{dT_{c(n)}}{dt} = -k_{tuc} \cdot A_{tuc_s} \cdot (T_{c(n)} - T_{tu(n)}) \quad (61)$$

gdje je:

- $M_{c_s}$  – masa cijevi za segment [kg]
- $k_{tuc}$  – koeficijent prolaza za stijenku i termo ulje [ $W/m^2K$ ]
- $A_{tuc_s}$  – površina izmjene topline za segment [ $m^2$ ]
- $n$  – broj segmenata za povratnu i dobavnu cijev,  $n=1,2,...5$

**Jednadžba bilance energije za termo ulje:**

$$M_{tu_s} \cdot c_{tu} \cdot \frac{dT_{tu(n)}}{dt} = \dot{m}_{tu} \cdot c_{tu} \cdot (T_{tu(n-1)} - T_{tu(n)}) + k_{tuc} \cdot A_{tuc_s} \cdot (T_{c(n)} - T_{tu(n)}) \quad (62)$$

Da bi se odredio koeficijent prolaza topline prema jednadžbi (68) koji uključuje prijelaz topline sa termo ulja na stijenku i obrnuto i provođenje do sredine stijenke cijevi, potrebno je izračunati brzinu strujanja termo ulja prema jednadžbi (63), zatim iz poznatih svojstava termo ulja i geometrije cjevovoda izračunati Reynoldsov, Prandtlov, te Nusseltov broj [13] te zatim dobiti vrijednost koeficijenta prijelaza topline.

Brzina termo ulja unutar dobavne i povratne cijevi jednaka je:

$$v_{tuc} = \frac{\dot{m}_{tu}}{\rho_{tu} \cdot A_{c_u}} \quad (63)$$

Površina unutarnjeg presjeka cijevi računa se prema jednadžbi (64):

$$A_{c_u} = \frac{D_{c_u}^2 \cdot \pi}{4} \quad (64)$$

Formula za izračunavanje Reynoldsovog broja glasi:

$$Re_{tuc} = \frac{\rho_{tu} \cdot v_{tuc} \cdot D_{c_u}}{\mu_{tu}} \quad (65)$$

Jednadžba za izračunavanje Nusseltovog broja je:

$$Nu_{tuc} = \frac{0,0398 \cdot Pr_{tuc} \cdot Re_{tuc}^{0,75}}{1 + 1,74 \cdot Re_{tuc}^{-0,125} \cdot (Pr_{tuc} - 1)} \quad (66)$$

Koeficijent prijelaza topline računa se pomoću jednadžbe (67):

$$\alpha_{tuc} = \frac{\lambda_{tu} \cdot Nu_{tuc}}{D_{c_u}} \quad (67)$$

Koeficijent prolaza topline izračunava se prema jednadžbi (68):

$$k_{tuc} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{tuc}} + \frac{D_{c_u}}{2 \cdot \lambda_{st}} \cdot \ln\left(\frac{D_{c_u} + t_c}{D_{c_u}}\right)} \quad (68)$$

**Tablica 25. Vrijednosti za izmjenu topline u povratnoj i dobavnoj cijevi**

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
$v_{tuc}$	2,5058	m/s
$Re_{tuc}$	$1,1313 \cdot 10^6$	-
$Pr_{tuc}$	5,7817	-
$Nu_{tuc}$	3248,8	-
$\alpha_{tuc}$	2366	W/m <sup>2</sup> K
$k_{tuc}$	1925,1	W/m <sup>2</sup> K

Površina izmjene topline računa se prema jednadžbi (69):

$$A_{tuc} = D_{c_u} \cdot \pi \cdot L_c \quad (69)$$

Površina vanjskog presjeka cijevi računa se prema jednadžbi (70):

$$A_{c_v} = \frac{D_{c_v}^2 \cdot \pi}{4} \quad (70)$$

Masa cijevi izračunata je jednadžbom (71):

$$M_c = \rho_{st} \cdot (A_{c_v} - A_{c_u}) \cdot L_c \quad (71)$$

Masa termoulja unutar povratne i dobavne cijevi :

$$M_{tu} = \rho_{tu} \cdot A_{c_u} \cdot L_c \quad (72)$$

Mase stijenke cijevi i termo ulja unutar, računaju se prema jednadžbama (73) i (74), dok je površina izmjene topline za segment cijevi definirana jednadžbom (75).

$$M_{c_s} = \frac{M_c}{5} \quad (73)$$

$$M_{tu_s} = \frac{M_{tu}}{5} \quad (74)$$

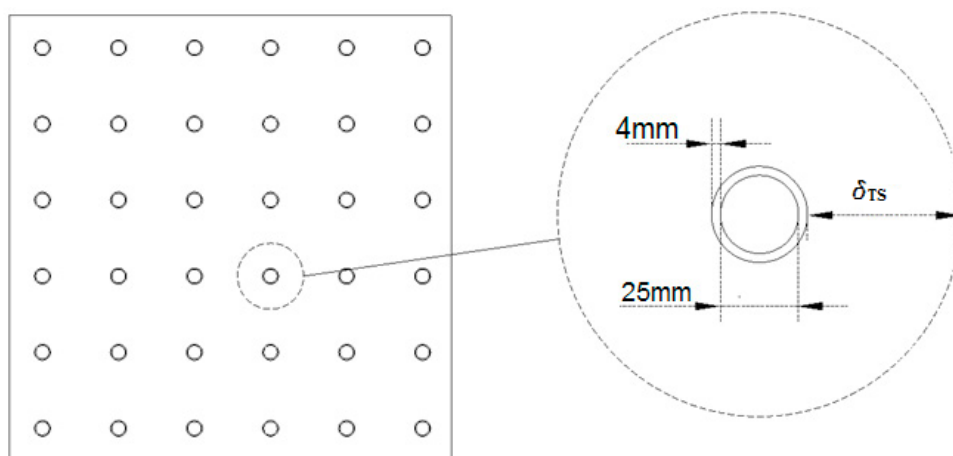
$$A_{tuc_s} = \frac{A_{tuc}}{5} \quad (75)$$

**Tablica 26. Izračunate vrijednosti za matematički model povratne i dobavne cijevi**

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
$A_{c_u}$	0,0177	m <sup>2</sup>
$A_{c_v}$	0,0227	m <sup>2</sup>
$A_{tuc}$	23,562	m <sup>2</sup>
$M_c$	1885	kg
$M_{tu}$	753,29	kg

## 9. TOPLINSKI SPREMNIK

Radi se o spremniku osjetne topline koji se postavlja umjesto dobavne ili povratne cijevi čija je zadaća da prilikom varijabilne potražnje za električnom energijom omogući rad ORC-a pri 100 %, tako omogućujući pravovremeno usklađivanje za potražnjom električne energije.



Slika 20. Toplinski spremnik [4]

Toplinski spremnik sastoji se od jednog bloka materijala za pohranu osjetne topline kroz kojeg je provučeno 36 cijevi od ugljičnog čelika dužine 50 metara kroz koje struji termo ulje. Broj cijevi je određen na način da se ostvari ista brzina strujanja pri nominalnim uvjetima kao kroz povratnu ili dobavnu cijev, ovisno koja je zamijenjena toplinskim spremnikom. Prilikom upotrebe toplinskog spremnika razmatraju se dva različita materijala za pohranu osjetne topline.

Tablica 27. Svojstva materijala toplinskog spremnika [4]

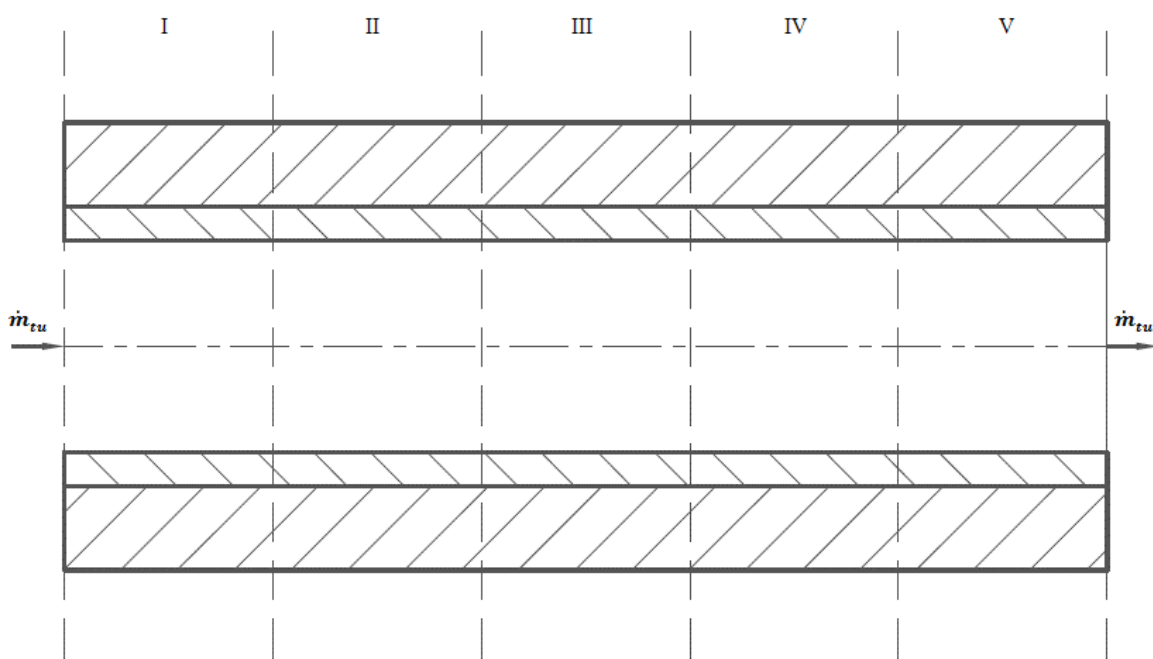
Materijal spremnika	$c_{ts}$ [J/kgK]	$\rho_{ts}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda_{ts}$ [W/mK]
Beton	1120	2400	2,2
Lijeвано željezo	500	7500	50

### 9.1. Matematički model toplinskog spremnika

Zbog jednostavnosti, matematički model dinamike procesa biti će opisan za jednu referentnu cijev oko koje se nalazi masa materijala za skladištenje toplinske energije. Kroz referentnu cijev struji termo ulje određenim masenim protokom. Ukupne dimenzije i masa spremnika, definirane su debljinom toplinskog spremnika  $\delta_{ts}$ .

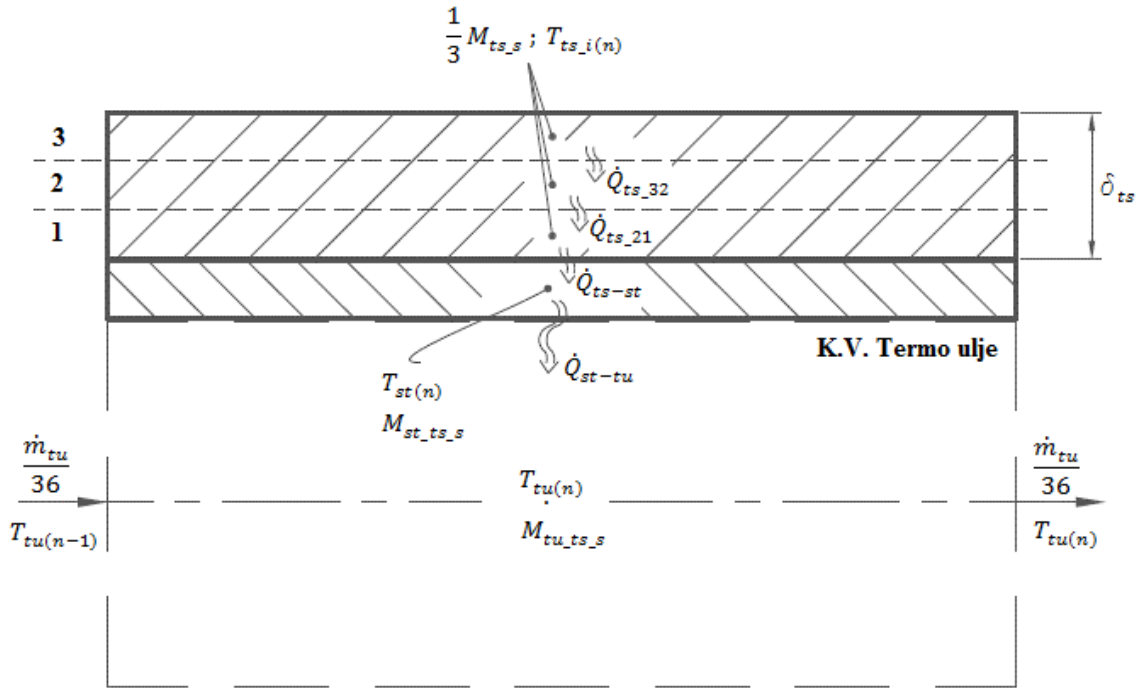
Tijekom izvođenja matematičkog modela, uvedene su sljedeće pretpostavke:

- Toplina se izmjenjuje samo u radijalnom smjeru, dok je prolaz topline u aksijalnom smjeru zanemaren;
- Pretpostavlja se savršeni dodir između materijala toplinskog spremnika i stijenke cijevi;
- Koeficijent prijelaza topline, kao i svojstva termo ulja, stijenke i toplinskog spremnika ostaju konstantna;
- Zanemaruju se toplinski gubici prema okolišu;
- Radi točnijih rezultata, toplinski spremnik je zajedno sa stijenkom cijevi i termo uljem koje struji unutar spremnika podijeljen na 5 segmenata u aksijalnom smjeru. Toplinski spremnik je zasebno još podijeljen na 3 segmenata u radijalnom smjeru.



**Slika 21. Presjek toplinskog spremnika podijeljenog na 5 segmenata u aksijalnom smjeru**

Analogno, kao i za prethodno izvedene jednadžbe matematičkog modela, izdvojiti će se jedan segment radi jasnijeg prikaza naknadno izvedenih jednadžbi na kojemu je prikazana dodatna podjela na 3 segmenta materijala toplinskog spremnika u radijalnom smjeru.



Slika 22. Segment toplinskog spremnika, stijenke i termo ulja

**Jednadžba bilance energije za termo ulje:**

$$M_{tu_{ts_s}} \cdot c_{tu} \cdot \frac{dT_{tu(n)}}{dt} = \frac{\dot{m}_{tu}}{36} \cdot c_{tu} \cdot (T_{tu(n-1)} - T_{tu(n)}) + k_{tuc_{ts}} \cdot A_{tuc_{ts_s}} \cdot (T_{st(n)} - T_{tu(n)}) \quad (76)$$

gdje je:

- $M_{tu_{ts_s}}$  – masa termo ulja za segment unutar toplinskog spremnika [kg];
- $k_{tuc_{ts}}$  – koeficijent prolaza topline za termo ulje i stijenku [ $W/m^2K$ ];
- $A_{tuc_{ts_s}}$  – površina izmjene topline za koju se svodi  $k_{tuc_{ts}}$  [ $m^2$ ].

**Jednadžba bilance energije za stijenku cijevi:**

$$M_{st\_ts\_s} \cdot c_{cts} \cdot \frac{dT_{st(n)}}{dt} = k_{ts\_st} \cdot A_{ts\_st\_s} \cdot (T_{ts\_1(n)} - T_{st(n)}) - k_{tuc\_ts} \cdot A_{tuc\_ts\_s} \cdot (T_{st(n)} - T_{tu(n)}) \quad (77)$$

gdje je:

- $M_{st\_ts\_s}$  – masa segmenta stijenke cijevi unutar toplinskog spremnika [kg];
- $c_{cts}$  – specifični toplinski kapacitet stijenke cijevi [J/kgK];
- $k_{ts\_st}$  – koeficijent prolaza topline za toplinski spremnik i stijenku cijevi [W/m<sup>2</sup>K];
- $A_{tuc\_ts\_s}$  – površina izmjene topline za koju se svodi  $k_{ts\_st}$  [m<sup>2</sup>].

**Jednadžba bilance energije za prvi segment toplinskog spremnika (i=1):**

$$\frac{M_{ts}}{15} \cdot c_{ts} \cdot \frac{dT_{ts\_1(n)}}{dt} = k_{ts\_21} \cdot A_{ts\_21\_s} \cdot (T_{ts\_2(n)} - T_{ts\_1(n)}) - k_{ts\_st} \cdot A_{ts\_st\_s} \cdot (T_{ts\_1(n)} - T_{st(n)}) \quad (78)$$

gdje je:

- $M_{ts}$  – ukupna masa toplinskog spremnika [kg];
- $c_{ts}$  – specifični toplinski kapacitet toplinskog spremnika [J/kgK];
- $k_{ts\_21}$  – koeficijent prolaza topline za prvi i drugi segment toplinskog spremnika u radijalnom smjeru [W/m<sup>2</sup>K];
- $A_{ts\_21\_s}$  – površina segmenta izmjene topline za koju se svodi  $k_{ts\_21}$  [m<sup>2</sup>].

**Jednadžba bilance energije za drugi segment toplinskog spremnika (i=2):**

$$\frac{M_{ts}}{15} \cdot c_{ts} \cdot \frac{dT_{ts\_2(n)}}{dt} = k_{ts\_32} \cdot A_{ts\_32\_s} \cdot (T_{ts\_3(n)} - T_{ts\_2(n)}) - k_{ts\_21} \cdot A_{ts\_21\_s} \cdot (T_{ts\_2(n)} - T_{ts\_1(n)}) \quad (79)$$



**Jednadžba bilance energije za treći segment toplinskog spremnika (i=3):**

$$\frac{M_{ts}}{15} \cdot c_{ts} \cdot \frac{dT_{ts,2(n)}}{dt} = -k_{ts,32} \cdot A_{ts,32,s} \cdot (T_{ts,3(n)} - T_{ts,2(n)}) \quad (80)$$

gdje je:

- $k_{ts,32}$  – koeficijent prolaza topline za prvi i drugi segment toplinskog spremnika u radijalnom smjeru [ $W/m^2K$ ];
- $A_{ts,32,s}$  – površina segmenta izmjene topline za koju se svodi  $k_{ts,32}$  [ $m^2$ ].

Za izračunavanje koeficijenta prolaza topline koji se nalazi u jednadžbi (76) potrebno je odrediti Reynoldsov i Nusseltov broj pomoću sljedećih jednadžbi:

$$Re_{ts} = \frac{\rho_{tu} \cdot v_{tuc} \cdot D_{u,ts}}{\mu_{tu}} \quad (81)$$

$$Nu_{ts} = \frac{0,0398 \cdot Pr_{ts} \cdot Re_{ts}^{0,75}}{1 + 1,74 \cdot Re_{ts}^{-0,125} \cdot (Pr_{ts} - 1)} \quad (82)$$

Zatim je iz Nusseltova broja moguće odrediti koeficijent prijelaza topline na strani termo ulja:

$$\alpha_{tu,ts} = \frac{\lambda_{tu} \cdot Nu_{ts}}{D_{u,ts}} \quad (83)$$

Koeficijenti prolaza topline računa se prema jednadžbi (84), kako slijedi:

$$k_{tuc,ts} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{tu,ts}} + \frac{D_{u,ts}}{2 \cdot \lambda_{cts}} \cdot \ln\left(\frac{D_{u,ts} + t_{cts}}{D_{u,ts}}\right)} \quad (84)$$

Koeficijente prolaza topline  $k_{ts,st}$ ,  $k_{ts,21}$  i  $k_{ts,32}$  kao i površine (izuzev površine  $A_{ts,st}$ ) za koje su svedeni (jednadžbe (78), (79) i (80)) nije moguće odmah izračunati zbog promjenjive debljine materijala toplinskog spremnika  $\delta_{ts}$  i zbog toga će se prikazati samo formule pomoću kojih se izračunavaju.

$$k_{ts\_st} = \frac{1}{\frac{D_{v\_ts}}{2 \cdot \lambda_{cts}} \cdot \ln\left(\frac{D_{v\_ts}}{D_{v\_ts} - t_{cts}}\right) + \frac{D_{v\_ts}}{2 \cdot \lambda_{ts}} \cdot \ln\left(\frac{D_{v\_ts} + \frac{\delta_{ts}}{3}}{D_{v\_ts}}\right)} \quad (85)$$

$$k_{ts\_21} = \frac{1}{\frac{D_{v\_ts} + \frac{2 \cdot \delta_{ts}}{3}}{2 \cdot \lambda_{ts}} \cdot \ln\left(\frac{D_{v\_ts} + \frac{2 \cdot \delta_{ts}}{3}}{D_{v\_ts} + \frac{\delta_{ts}}{3}}\right) + \frac{D_{v\_ts} + \frac{2 \cdot \delta_{ts}}{3}}{2 \cdot \lambda_{ts}} \cdot \ln\left(\frac{D_{v\_ts} + \delta_{ts}}{D_{v\_ts} + \frac{2 \cdot \delta_{ts}}{3}}\right)} \quad (86)$$

$$k_{ts\_32} = \frac{1}{\frac{D_{v\_ts} + \frac{4 \cdot \delta_{ts}}{3}}{2 \cdot \lambda_{ts}} \cdot \ln\left(\frac{D_{v\_ts} + \frac{4 \cdot \delta_{ts}}{3}}{D_{v\_ts} + \delta_{ts}}\right) + \frac{D_{v\_ts} + \frac{4 \cdot \delta_{ts}}{3}}{2 \cdot \lambda_{ts}} \cdot \ln\left(\frac{D_{v\_ts} + \frac{5 \cdot \delta_{ts}}{3}}{D_{v\_ts} + \frac{4 \cdot \delta_{ts}}{3}}\right)} \quad (87)$$

Površine, za koje su svedeni koeficijenti prolaza topline iz jednadžbi (86) i (87), računaju se pomoću jednadžbi (88) i (89), kako slijedi:

$$A_{ts\_21} = \left(D_{v\_ts} + \frac{2 \cdot \delta_{ts}}{3}\right) \cdot \pi \cdot L_c \quad (88)$$

$$A_{ts\_32} = \left(D_{v\_ts} + \frac{4 \cdot \delta_{ts}}{3}\right) \cdot \pi \cdot L_c \quad (89)$$

Površine izmjene topline za segment toplinskog spremnika u aksijalnom smjeru računaju se pomoću jednadžbi (90) i (91):

$$A_{ts\_21\_s} = \frac{A_{ts\_21}}{5} \quad (90)$$

$$A_{ts\_32\_s} = \frac{A_{ts\_32}}{5} \quad (91)$$

**Tablica 28. Vrijednosti za izmjenu topline između stijenke cijevi i termo ulja unutar toplinskog spremnika**

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
$Re_{ts}$	$1,8854 \cdot 10^5$	-
$Pr_{ts}$	5,7818	-
$Nu_{ts}$	737,627	-
$\alpha_{tu_{ts}}$	3223,2	W/m <sup>2</sup> K
$k_{tuc_{ts}}$	2878,9	W/m <sup>2</sup> K

Potrebno je naglasiti da se unutar koeficijenata prolaza topline koji uključuju provođenje topline od sredine stijenke cijevi do sredine materijala toplinskog spremnika, te provođenje od sredine segmenta materijala toplinskog spremnika u radijalnom smjeru do idućeg segmenta, nalazi debljina toplinskog spremnika  $\delta_{ts}$  koja će se mijenjati. Također toplinska provodnost spremnika  $\lambda_{ts}$  će biti drugačija ovisno o odabranom materijalu toplinskog spremnika i zbog toga se koeficijenti prolaza topline neće posebno izračunavati, već će se naglasiti utjecaj te dvije vrijednosti tijekom rezultata simulacije u sljedećem poglavlju.

Površine izmjene topline računaju se prema jednadžbama (92) i (93):

$$A_{tuc_{ts}} = D_{u_{ts}} \cdot \pi \cdot L_c \quad (92)$$

$$A_{ts_{st}} = D_{v_{ts}} \cdot \pi \cdot L_c \quad (93)$$

Površina unutarnjeg presjeka cijevi jednaka je:

$$A_{u_{ts}} = \frac{D_{u_{ts}}^2 \cdot \pi}{4} \quad (94)$$

Površina vanjskog presjeka cijevi jednaka je:

$$A_{v_{ts}} = \frac{D_{v_{ts}}^2 \cdot \pi}{4} \quad (95)$$

Masa termo ulja unutar toplinskog spremnika iznosi:

$$M_{tu_{ts}} = \rho_{tu} \cdot A_{u_{ts}} \cdot L_c \quad (96)$$

Masa stijenke cijevi unutar toplinskog spremnika iznosi:

$$M_{st_{ts}} = \rho_{cst} \cdot (A_{v_{ts}} - A_{u_{ts}}) \cdot L_c \quad (97)$$

Površine izmjene topline za segment, kao i mase definirane su jednadžbama (98), (99), (100) i (101):

$$M_{tu_{ts,s}} = \frac{M_{tu_{ts}}}{5} \quad (98)$$

$$M_{st_{ts,s}} = \frac{M_{st_{ts}}}{5} \quad (99)$$

$$A_{tuc_{ts,s}} = \frac{A_{tuc_{ts}}}{5} \quad (100)$$

$$A_{ts_{st,s}} = \frac{A_{ts_{st}}}{5} \quad (101)$$

**Tablica 29. Podaci za cijev od ugljičnog čelika [4]**

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
$D_{u_{ts}}$	25	mm
$t_{cts}$	4	mm
$D_{v_{ts}}$	33	mm
$c_{cts}^*$	461	J/kgK
$\rho_{cts}^*$	7850	kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{cts}^*$	50	W/mK

\*-podaci uzeti iz toplinskih tablica [14]

**Tablica 30. Izračunate vrijednosti za matematički model toplinskog spremnika**

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
$A_{tuc\_ts}$	3,927	$m^2$
$A_{ts\_st}$	5,184	$m^2$
$A_{u\_ts}$	0,0004909	$m^2$
$A_{v\_ts}$	0,0008553	$m^2$
$M_{tu\_ts}$	20,925	kg
$M_{st\_ts}$	143,037	kg

Kao što je rečeno u uvodnom dijelu poglavlja, ukupne dimenzije i masa spremnika određene su debljinom toplinskog spremnika  $\delta_{ts}$ . Površina tako promjenjivog presjeka toplinskog spremnika jednaka je:

$$A_{ts} = \frac{D_{ts}^2 \cdot \pi}{4} - A_{v\_ts} \quad (102)$$

gdje je:

- $A_{ts}$  – površina presjeka toplinskog spremnika koja se mijenja [ $m^2$ ];
- $D_{ts}$  – promjer toplinskog spremnika [m].

Promjer toplinskog spremnika izračunava se prema jednadžbi (103):

$$D_{ts} = D_{v\_ts} + 2 \cdot \delta_{ts} \quad (103)$$

Masa spremnika jednaka je:

$$M_{ts} = \rho_{ts} \cdot A_{ts} \cdot L_c \quad (104)$$

Iz jednadžbe (103) vidi se da se promjenom debljine spremnika utječe na iznos površine definirane jednadžbom (102), a time i na masu toplinskog spremnika  $M_{ts}$  na koju još dodatno utječe gustoća  $\rho_{ts}$  materijala koji je odabran za toplinski spremnik.

Masa segmenta materijala toplinskog spremnika uzimajući u obzir podjelu toplinskog spremnika u aksijalnom i radijalnom smjeru iznosi:

$$M_{ts\_s} = \frac{M_{ts}}{15} \quad (105)$$

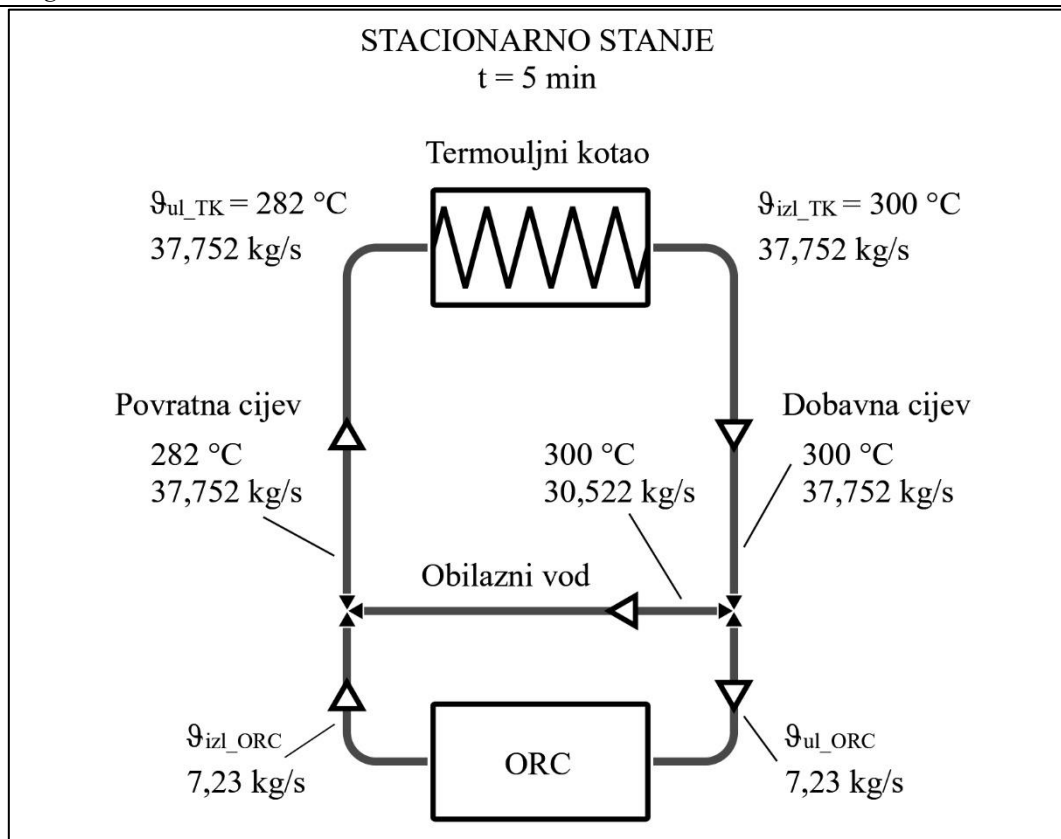
## 10. REZULTATI SIMULACIJE

Simulacija je zamišljena da postrojenje (Slika 2.) u uvjetima otočnog pogona radi pri 30% nazivnog opterećenja ložišta kotla na biomasu (kotlovskog postrojenja) i da pri tome zadovoljava potrebe za toplinskom energijom tvrtke za proizvodnju drvnih peleta. Zatim se pretpostavlja nagli skok do 100% za potražnjom električne energije i proučavaju se prijelazne pojave sustava u odnosu na opterećenje kotlovskog postrojenja koje nije u mogućnosti trenutno osigurati potreban toplinski učin, nego zbog određene tromosti sustava (zbog veličine ložišta, izgaranja biomase, vrste termouljnog kotla,...) potrebno je određeno vrijeme da se osigura maksimalni toplinski učin za nominalnu snagu (Tablica 1.). To će se kroz simulaciju prikazati putem dobave goriva (drvene sječke) gdje će se razlikovati dva slučaja. U prvom slučaju, pretpostavlja se da dobava goriva linearno raste u trajanju od 15 min i da nastali dimni plinovi zatim izmjenjuju toplinu unutar termouljnog kotla tako zagrijevajući termo ulje na potrebnu temperaturu. U drugom slučaju dobava goriva također linearno raste, ali u trajanju od 20 min, čime se želi ukazati na brži i sporiji sustav kotlovskog postrojenja za osiguravanje potrebnog toplinskog učina.

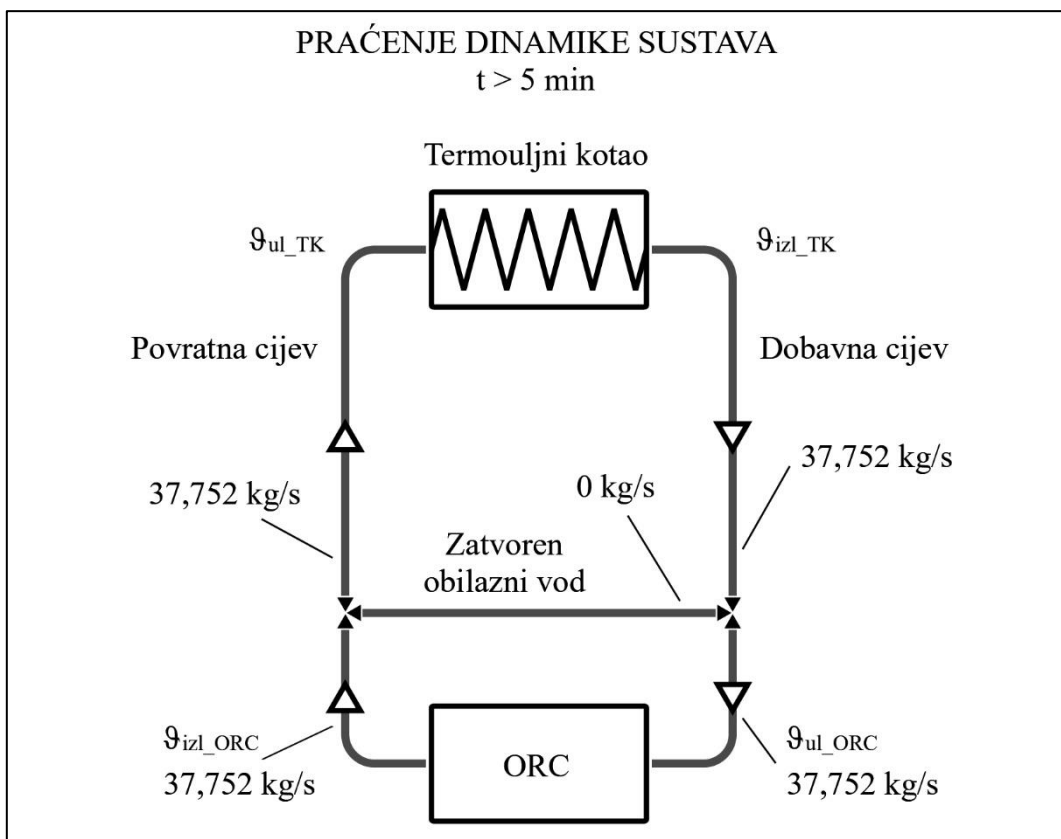
### 10.1. Stacionarno stanje sustava

U svrhu praćenja dinamike sustava, kreće se iz stacionarnog stanja pri 30% nazivnog opterećenja kotlovskog postrojenja u trajanju od 5 minuta, zatim se pretpostavlja nagli skok u potražnji za električnom energijom kao što je opisano u prethodnom dijelu. Temperatura na izlazu iz termouljnog kotla je unatoč smanjenom toplinskom učinku zadržana na 300 °C, dok je ulazna temperatura u termouljni kotao 282 °C, čime je promjena temperature kroz termouljni kotao smanjena sa 60 °C na 18 °C (razlika smanjena za 30%). To je omogućeno obilaznim vodom kroz koji se propušta veći dio masenog protoka (Slika 23.), dok ostatak (oko 19% masenog protoka termo ulja) ide kroz ORC i zatim nakon što izmijeni toplinu u isparivaču sa silikonskim uljem ulazi u izolirano (adijabatsko) mješalište gdje se miješa sa termo uljem iz obilaznog voda da bi na izlazu bio ponovo ukupan maseni protok termo ulja temperature 282 °C.

U trenutku trenutne potražnje za električnom energijom, obilazni vod se zatvara i kroz ORC se propušta maksimalni protok termo ulja kao što to prikazuje Slika 24.

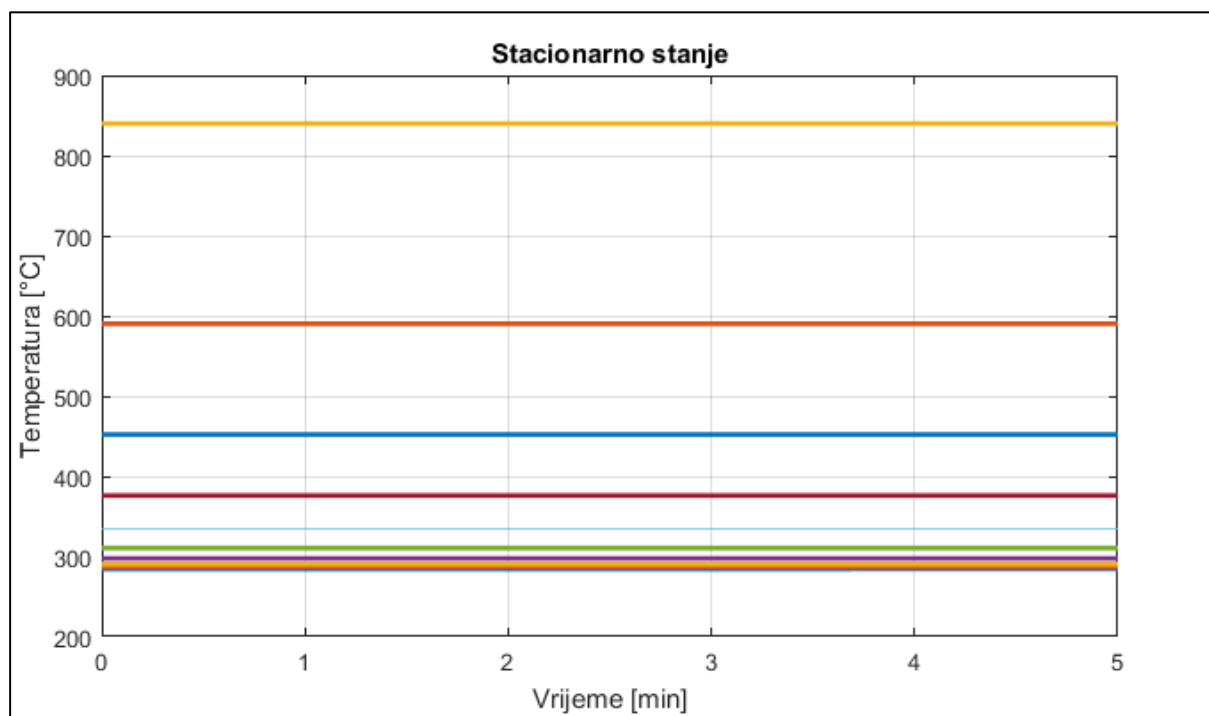


Slika 23. Stacionarno stanje prvih pet minuta simulacije

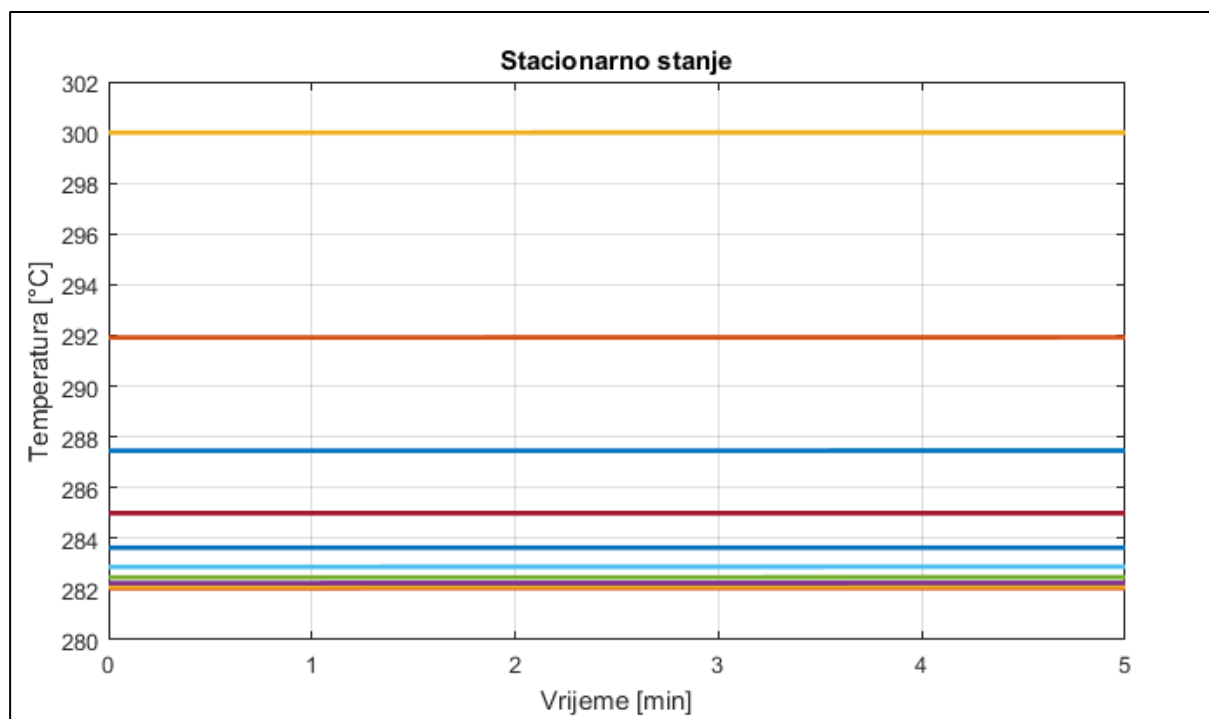


Slika 24. Praćenje dinamike nakon pete minute

Kako bi se pokazalo da izvedeni matematički modeli zadovoljavaju stacionarna stanja, simulacija je izvedena za prvih 5 minuta kao što to prikazuju slike u nastavku.

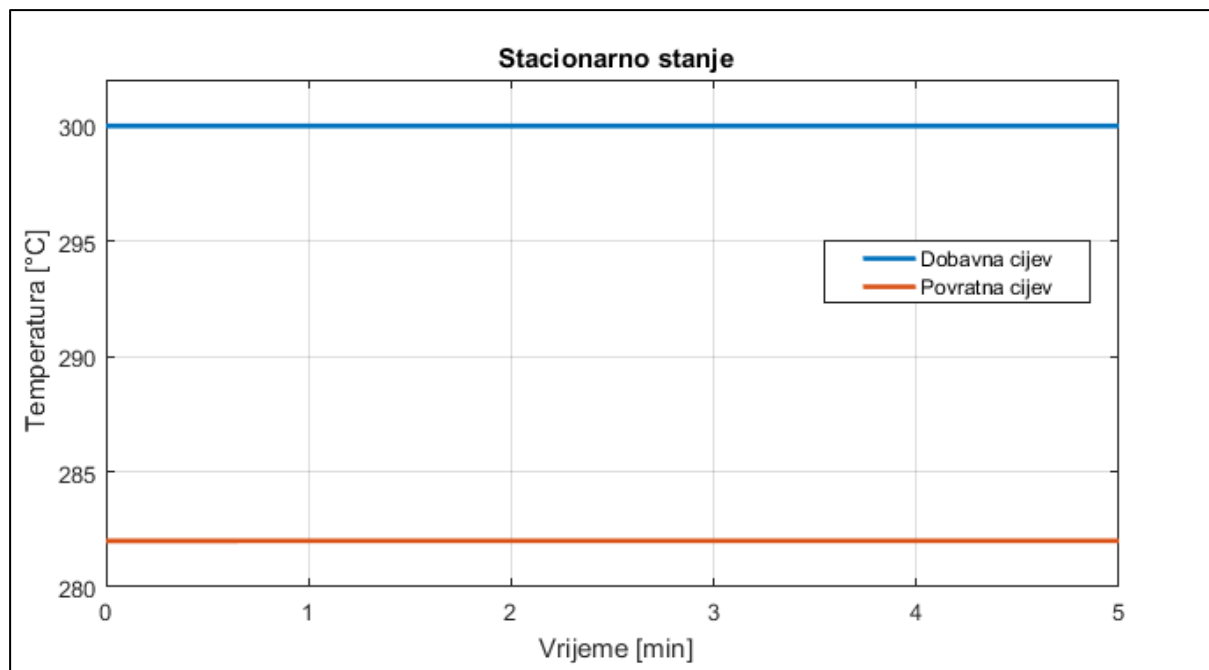


**Slika 25. Odziv temperatura po segmentima za dimne plinove unutar termouljnog kotla**

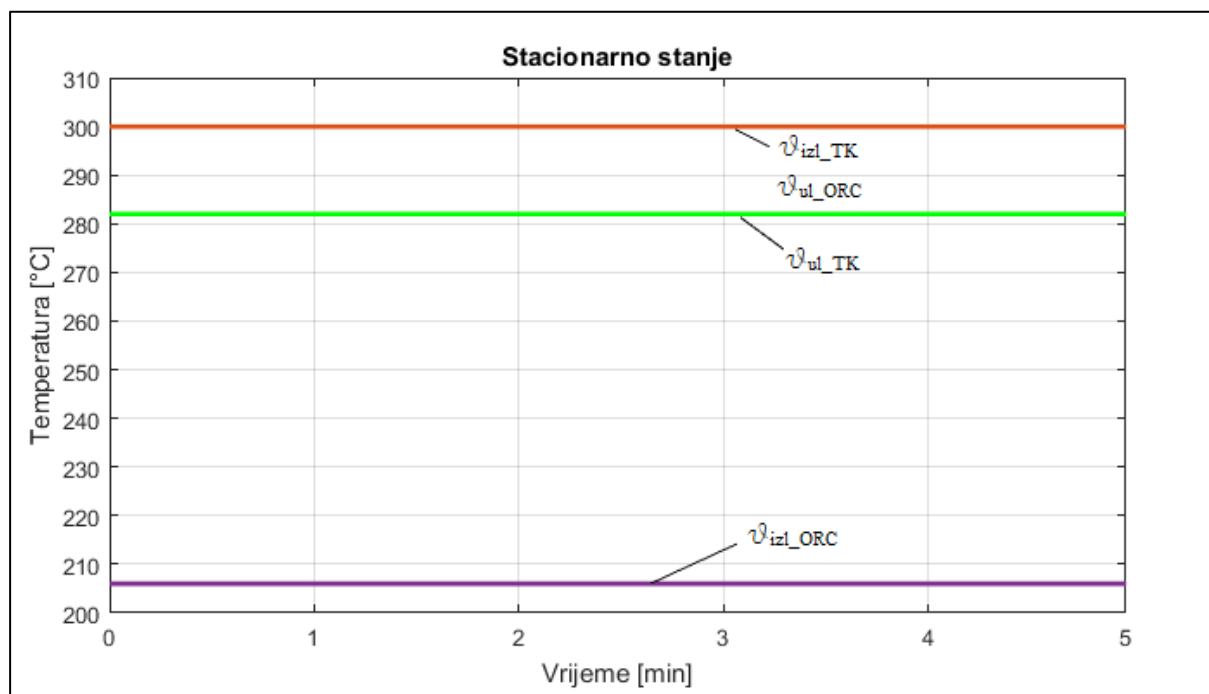


**Slika 26. Odziv temperatura po segmentima za termo ulje unutar termouljnog kotla**





Slika 27. Odziv temperatura po segmentima za dobavnu i povratnu cijev



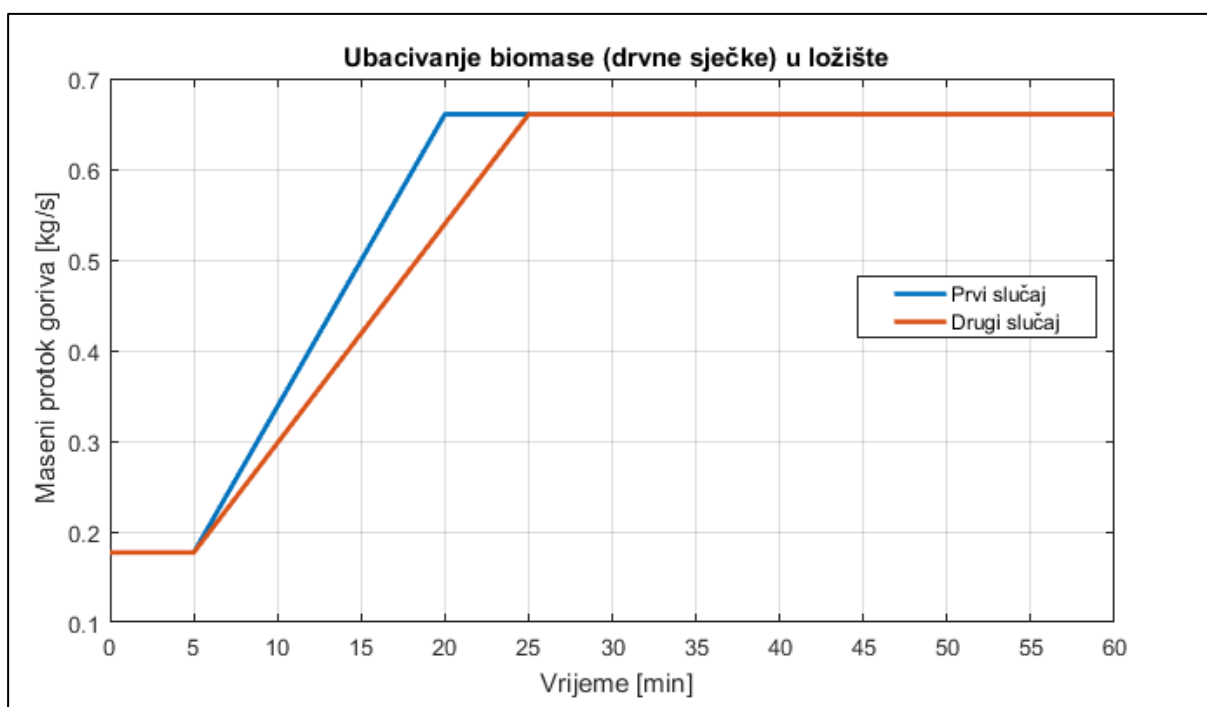
Slika 28. Odziv karakterističnih temperatura za slučaj s obilaznim vodom

Nakon što matematički modeli zadovoljavaju stacionarna stanju kako pokazuju prethodne slike, moguće je krenuti sa simulacijom dinamike procesa.

## 10.2. Rezultati simulacije za slučaj bez toplinskog spremnika

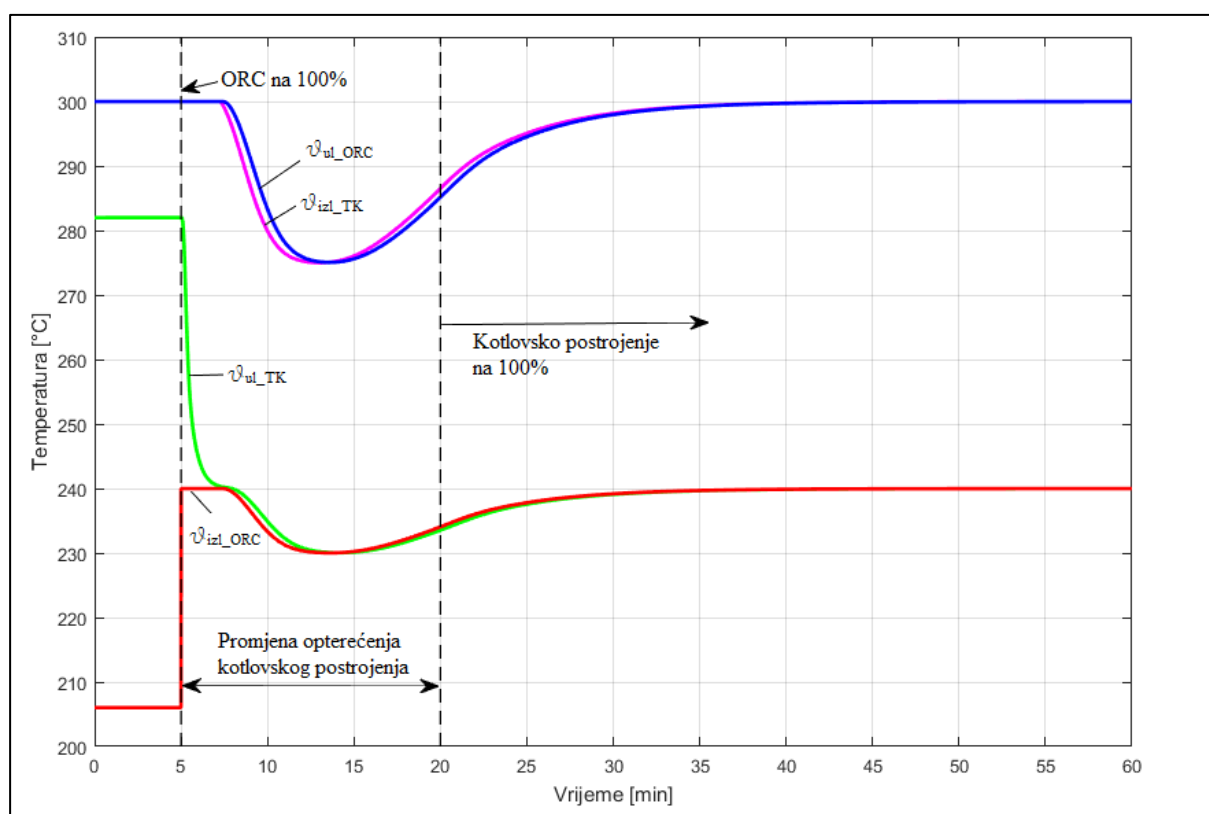
Kako bi se mogao usporediti značaj toplinskog spremnika, prvo se provodi simulacija za slučaj bez njegov postavljanja umjesto dobavne ili povratne cijevi.

Prvo će biti prikazani odzivi postrojenja za prvi slučaj kada je linearni porast dobave goriva u trajanju od 15 minuta, a zatim odzivi za drugi slučaj kada dobava traje 20 minuta.

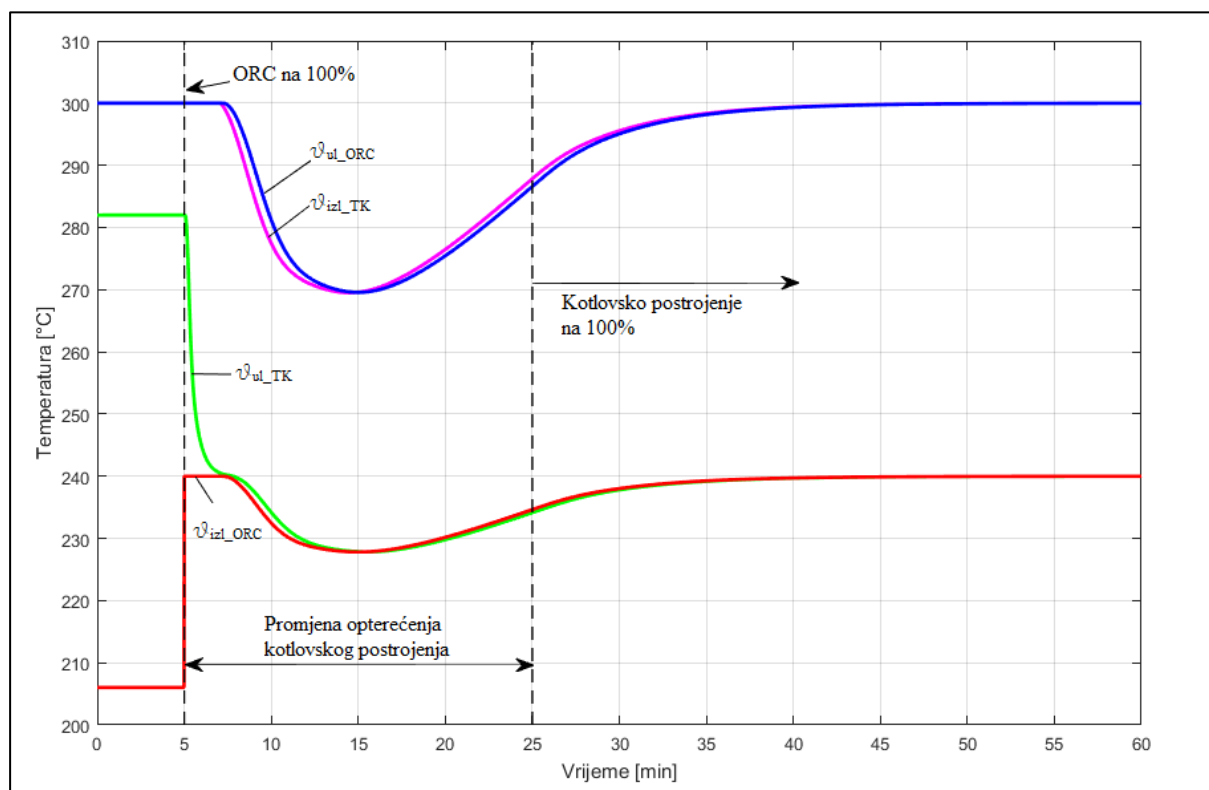


Slika 29. Linearni porast dobave goriva

Promjena opterećenja kotlovskog postrojenja kojemu treba određeno vrijeme da osigura potreban toplinski učin, prikazati će se putem masenog protoka goriva koje se ubacuje u ložište kotlovskog postrojenja gdje zatim dimni plinovi nastali procesom izgaranja izmjenjuju toplinu sa termo uljem u izmjenjivaču termouljnog kotla.

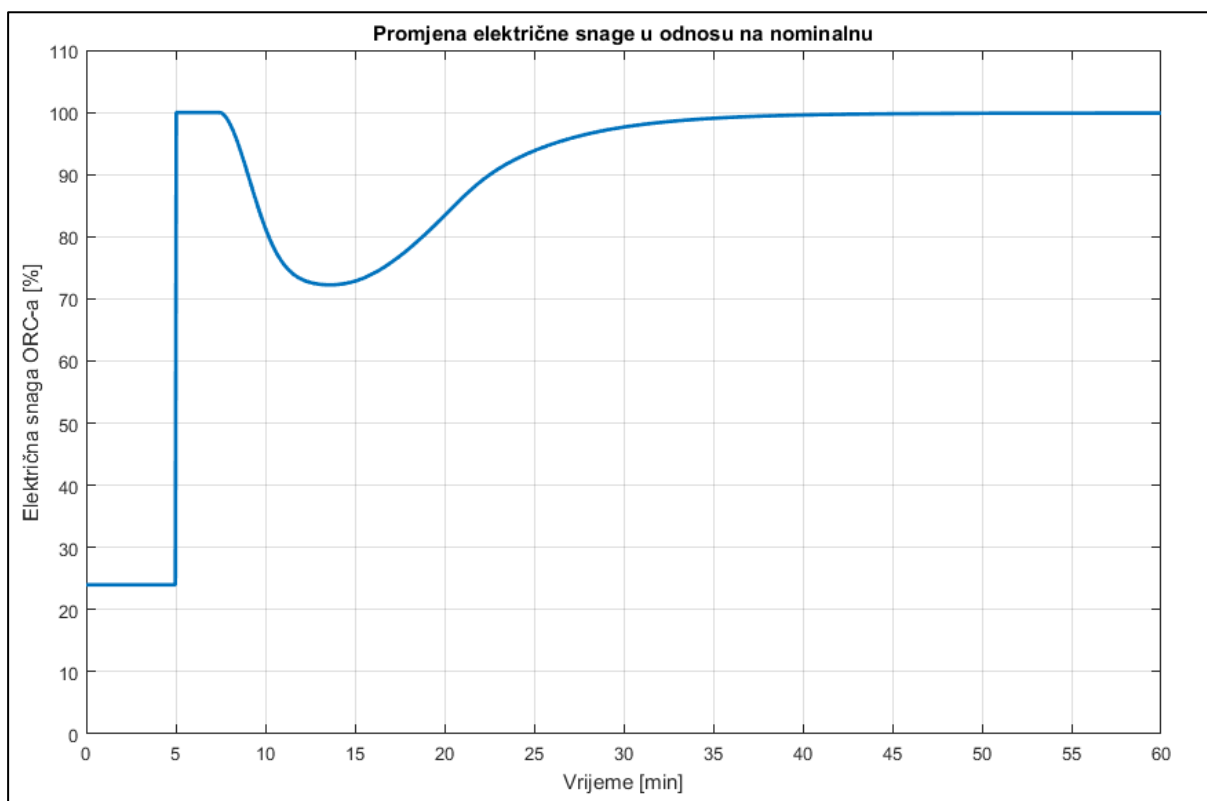


Slika 30. Vremenski profil temperatura za prvi slučaj slučaj



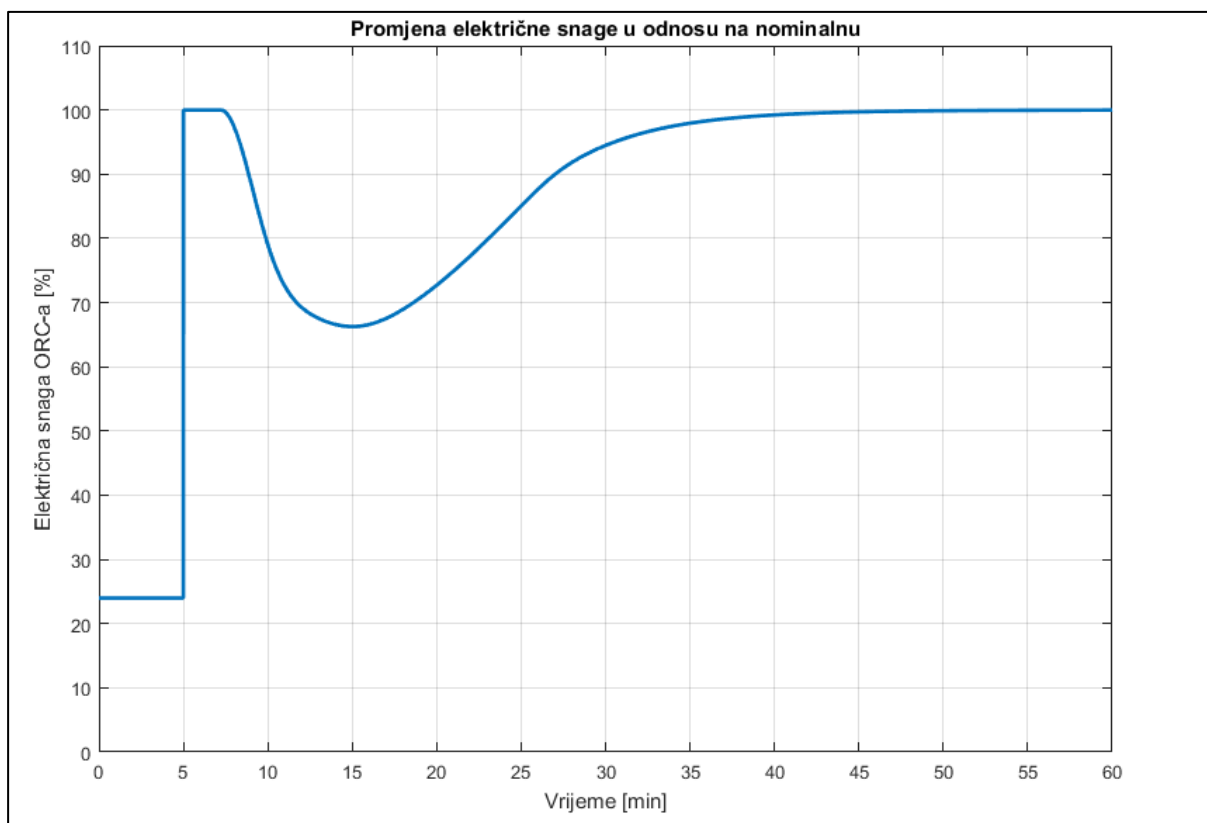
Slika 31. Vremenski profil temperatura za drugi slučaj

Prvi slučaj, kada nema toplinskog spremnika i kada promjena opterećenja kotlovskog postrojenja traje petnaest minuta, pokazuje da unutar pete i dvadesete minute dolazi do značajnog pada temperature na ulazu u ORC. To se događa zbog toga što u petoj minuti, potražnja za električnom snagom naglo skoči na 100%, a kotlovsko postrojenje nije u mogućnosti trenutno osigurati potreban toplinski učin. Do naglog pada temperature ne dolazi odmah, nego zbog inercije sustava, to se događa tek oko osme minute nakon čega slijedi znatan pad temperature na ulazu u ORC. Minimum temperature termo ulja je oko dvanaeste minute nakon čega slijedi porast koji traje sve do četrdesete minute kada je opet postignuta maksimalna temperatura termo ulja na ulazu u ORC. Kod drugog slučaja vidimo još veći pad temperature termo ulja na ulazu u ORC i sporije postizanje maksimuma koje traje do četrdeset i pete minute. Kako se to odražava na električnu snagu prikazuju slike ispod.



**Slika 32. Promjena električne snage za prvi slučaj bez toplinskog spremnika**

Sa slike je vidljivo da bez spremnika nije moguće udovoljit zahtjevu od 100% za potražnjom električne energije tokom cijelog prijelaznog razdoblja zbog pada temperature termo ulja na ulazu u ORC. Tijekom prvih pet minuta električna snaga ORC-a iznosi oko 24% nominalne [4].



**Slika 33. Promjena električne snage za drugi slučaj bez toplinskog spremnika**

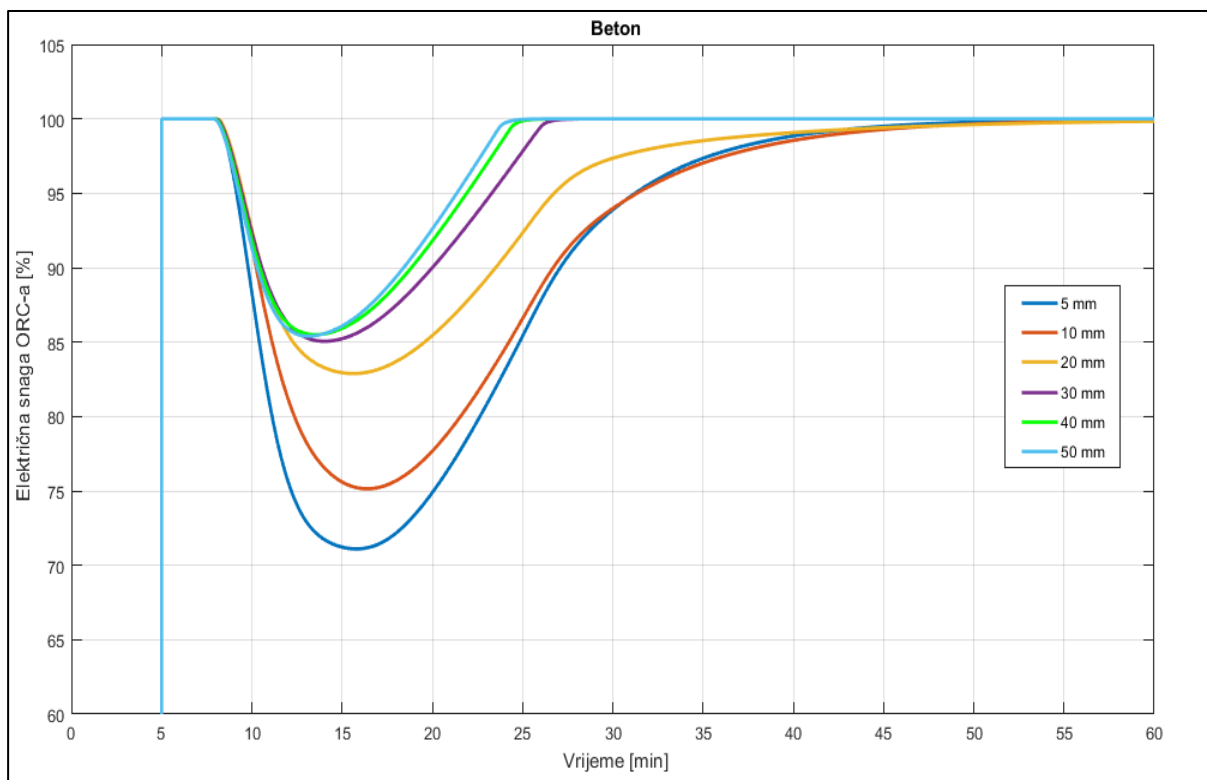
Minimum električne snage za drugi slučaj bez toplinskog spremnika iznosi oko 67% u odnosu na nominalnu, što je oko 5% manje u odnosu na prvi slučaj. Upravo zbog većeg pada temperatura termo ulja i zbog toga električne snage ORC-a, upotreba toplinskih spremnika razmatrati će se za drugi slučaj.

### 10.3. Rezultati simulacije sa toplinskim spremnikom

Toplinski spremnik se postavlja umjesto dobavne ili povratne cijevi. Prilikom simulacije korištena su dva različita materijala toplinskog spremnika. Prvo se koristi beton, a zatim lijevano željezo. Masa spremnika se mijenja s obzirom na promjenu debljine toplinskog spremnika i imati će bitan utjecaj na ponašanje cijelog sustava. Simulacija se provodi za različite debljine materijala toplinskog spremnika.

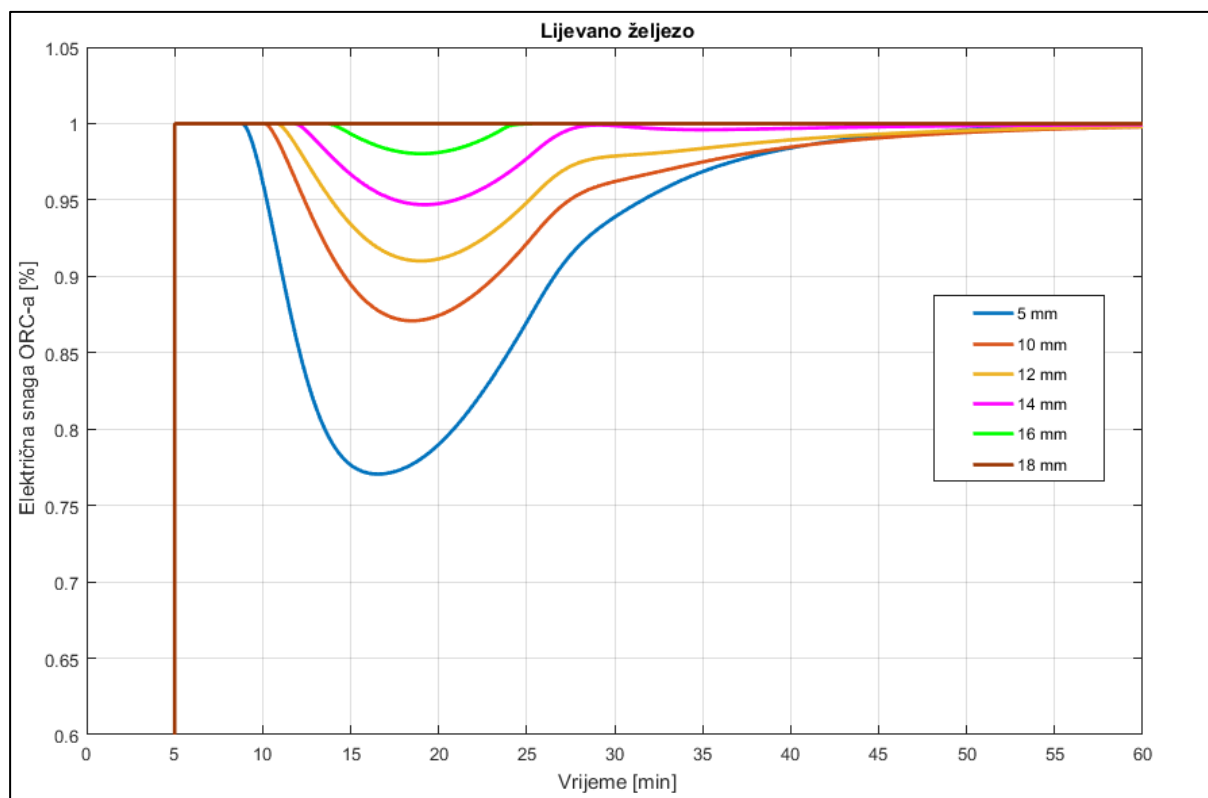
### 10.3.1 Spremnik ispred termouljnog kotla

Prvo se toplinski spremnik postavlja umjesto povratne cijevi i kao prvi materijal koristi se beton, a kao drugi lijevano željezo. Utjecaj debljine i pozicioniranje toplinskog spremnika ispred termouljnog kotla prikazuju slike u nastavku.



**Slika 34. Toplinski spremnik od betona smješten umjesto povratne cijevi**

Ako se za materijal toplinskog spremnika odabere beton, vidljivo je da se povećanjem debljine toplinskog spremnika može smanjiti pad električne snage minimalnog iznosa 67% (za slučaj bez toplinskog spremnika) na minimalno 86% u odnosu na nominalnu. Daljnje povećanje debljine materijala toplinskog spremnika iznad 40 mm nema više nikakvog utjecaja.



**Slika 35. Toplinski spremnik od lijevanog željeza smješten umjesto povratne cijevi**

Za razliku od betona, upotrebom lijevanog željeza moguće je udovoljiti zahtjevu od 100% za potražnjom električne energije tokom cijelog prijelaznog razdoblja opterećenja kotlovskog postrojenja. Također potrebne su puno manje debljine materijala toplinskog spremnika zahvaljujući puno većom iznosu toplinske provodnosti lijevanog željeza u odnosu na beton.

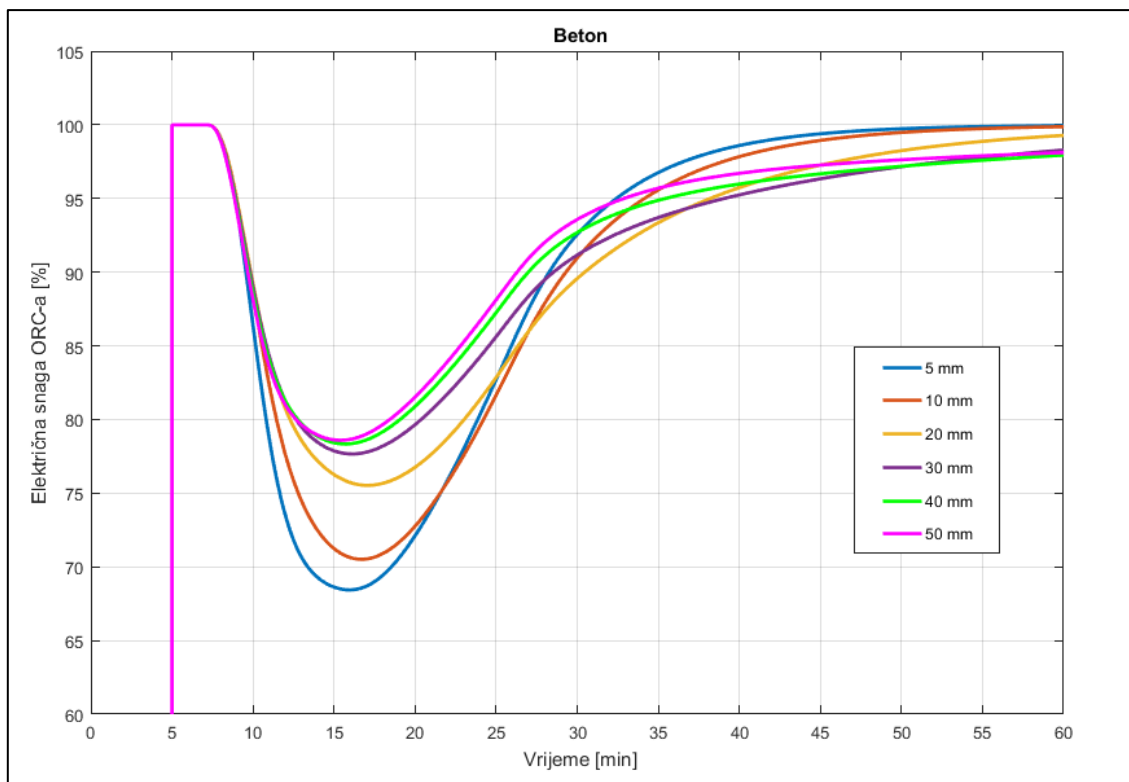
**Tablica 31. Masa toplinskih spremnika za slučaj postavljanja umjesto povratne cijevi**

Materijal spremnika	Debljina	Ukupna masa ( $M_{ts} \cdot 36$ )*
Beton	18 [mm]	12,459 [t]
Lijeivano željezo	18 [mm]	38,934 [t]

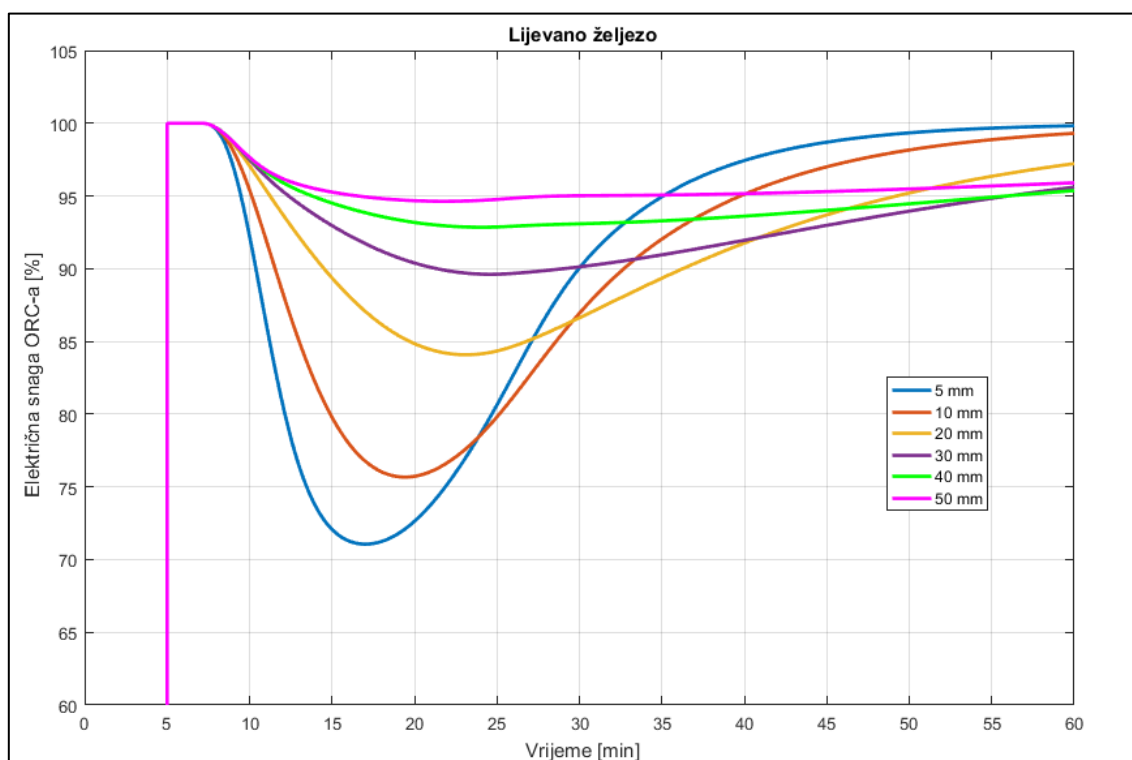
\*-masa toplinskog spremnika računa se pomoću jednadžbe (104)

Radi bolje usporedbe, izračunata je ukupna masa spremnika za slučaj jednakih debljina.

### 10.3.2 Spremnik iza termouljnog kotla



**Slika 36. Toplinski spremnik od betona smješten umjesto dobavne cijevi**



**Slika 37. Toplinski spremnik od lijevanog željeza smješten umjesto dobavne cijevi**



## 11. ZAKLJUČAK

Za vrijeme rada postrojenja u uvjetima otočnog pogona, na temelju odziva provedene simulacije u slučaju kada nema toplinskog spremnika, može se vidjeti da postrojenje nije u mogućnosti udovoljiti trenutnim potrebama za potražnjom električne energije.

Uporabom toplinskih spremnika moguće je udovoljiti zahtjevu za trenutnom potražnjom električne energije i to samo u slučaju kada se koristi lijevano željezo. Zahvaljujući većem iznosu toplinske provodnosti lijevanog željeza (50 W/mK) u odnosu na beton (2,2 W/mK) omogućuje se bolje iskorištavanje ukupne akumulacijske mase u kojoj je pohranjena toplinska energija. Iako lijevano željezo pokazuje bolje rezultate, takav spremnik ima znatno veću masu. Uzimajući u obzir istu debljinu materijala toplinskog spremnika od  $\delta_{ts}=18$  mm kod koje se ostvaruje zahtjevana potražnja za električnom energijom, ukupna masa toplinskog spremnika od lijevanog željeza je oko 39 tona, dok je ukupna masa toplinskog spremnika od betona 12 tona.

Postavljanje spremnika je također vrlo bitno i nije isto da li se spremnik nalazi ispred ili iza termouljnog kotla. Za slučaj postavljanja spremnika ispred termouljnog kotla bolje je iskorištavanje akumulirane toplinske energije unutar toplinskog spremnika zbog veće temperaturne razlike između termo ulja i spremnika, što rezultira i većim toplinskim tokom između spremnika i termo ulja. Zato je jedino za taj slučaj ostvareno vođenje ORC procesa pri 100% tijekom promatrane promjene opterećenja kotlovskog postrojenja.

## LITERATURA

- [1] Labudović, B.: Osnove primjene biomase, Energetika marketing d.o.o, Zagreb, 2012.
- [2] <http://www.energetika-net.com/specijali/projekt-prica/energija-iz-kogeneracijskog-postrojenja-za-proizvodnju-peleta-15791>, datum pristupa 07.02.2018.
- [3] Čehajić N.; Halilčević S.; Softić I. (2014) Primjena organskog Rankinovog ciklusa (ORC) i prikladni radni fluidi. *Tehnički glasnik*, 8, 3, str. 229-237.
- [4] Iora P.; Di Marcoberardino G.; Invernizzi C.M.; Manzolini G.; Belotti P.; Bini R. (2017) Dynamic analysis of off-grid systems with ORC plants adopting various solution for the thermal storage. *Energy Procedia*, 129, str. 216-223.
- [5] <http://www.caribooindustrialelectric.ca/orc-projects.html>, datum pristupa 10.02.2018.
- [6] Lai N.A.; Wendland M.; Fischer J. (2011) Working fluids for high-temperature organic Rankine cycles. *Energy*, 36, str. 199-211.
- [7] <https://www.turboden.com/>, datum pristupa 13.02.2018.
- [8] <http://actaenergetica.org/article/en/operational-parameters-of-low-power-orc-biomass-plant.html?tab=article>, datum pristupa 13.02.2018.
- [9] <https://secure.investni.com/static/library/invest-ni/documents/thermal-oil-technology-technical-investigation-report-sd-march-2010.pdf>, datum pristupa 15.02.2018.
- [10] <http://www.ecosmart-energy.co.uk/business/biomass/kohlbach-commercial-range/>, datum pristupa 16.02.2018.
- [11] <https://www.therminol.com/products/Therminol-72>, datum pristupa 16.02.2018.
- [12] <http://www.wellonsfei.ca/en/reciprocating-grate.aspx>, datum pristupa 20.02.2018.
- [13] Galović, A.: Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [14] Halasz B., Galović A., Boras I.: Toplinske tablice, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [15] Kharat R.; Bhardwaj N.; Jha R.S. (2009) Development of heat transfer coefficient for concentric helical coil heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 48, str. 2300-2308.
- [16] [https://www.holzkuier.com/energie/2013/02/fuer\\_ein\\_oekologischesmorgen.html](https://www.holzkuier.com/energie/2013/02/fuer_ein_oekologischesmorgen.html), datum pristupa 23.02.2018.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**